

**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

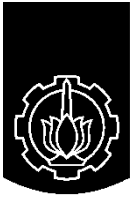
Optimisasi Daya *Photovoltaic* pada kondisi *Partially Shaded* dengan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) *Double Diode Model*

Muhammad Irfan Bahrudin  
NRP 07111545000078

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

*Photovoltaic Power Optimization Partially Shaded condition with Maximum Power Point Tracker (MPPT) Method Used Particle Swarm Optimization (PSO) Double Diode Model.*

Muhammad Irfan Bahrudin  
NRP 07111545000078

Supervisor  
Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph. D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Optimisasi Daya *Photovoltaic* pada kondisi *Partially Shaded* dengan *Maximum Powet Point Tracker* (MPPT) Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) *Double Diode Model*.** ” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018

Muhammad Nfan Bahrudin  
Nrp. 07111545000078

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

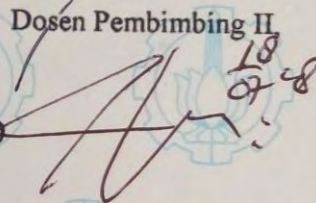
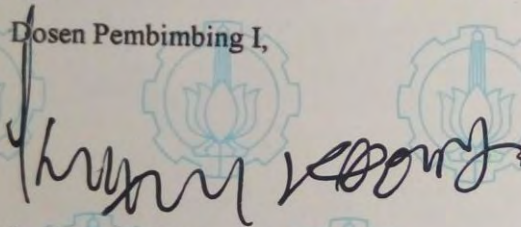
**Optimisasi Daya Photovoltaic pada kondisi Partially Shaded dengan  
Maximum Power Point Tracker (MPPT) Menggunakan Metode  
Particle Swarm Optimization (PSO) Double Diode Model  
TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II**

 18/07/18

**Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.**  
**NIP. 196308171990031001**

**Dedet Candra R. ST., M.Eng., Ph. D.**  
**NIP. 197311192000031001**



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Optimisasi Daya *Photovoltaic* pada kondisi *Partially Shaded* dengan  
*Maximum Power Point Tracker* (MPPT) Menggunakan Metode  
*Particle Swarm Optimization* (PSO) *Double Diode Model***

Nama Mahasiswa : Muhammad Irfan Bahrudin  
NRP : 07111545000078  
Pembimbing 1 : Prof. Ir. Imam Robandi, MT.  
Pembimbing 2 : Dedet Candra Riawan, ST. M.Eng., Ph. D.

**ABSTRAK**

Sistem Fotovoltaik merupakan alat utama yang terdapat di Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sistem Fotovoltaik memiliki permasalahan performansi daya yang dihasilkan. Daya yang dihasilkan seringkali tidak maksimum tergantung pada radiasi matahari dan panas lingkungan. Oleh karena itu diperlukan sebuah metode untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh Sistem Fotovoltaik. Metode memaksimalkan daya keluaran dari Sistem Fotovoltaik disebut *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Fungsi dari MPPT adalah mencari titik maksimum pada panel surya atau *Maximum Power Point* (MPP) yang membutuhkan teknik atau algoritma optimisasi. Proses pencarian MPP pada Sistem Fotovoltaik dibutuhkan teknik atau algoritma optimisasi. Pada keadaan normal untuk mencari MPP dapat menggunakan algoritma *Perturb and Observed* (P&O). Algoritma ini sering digunakan karena teknik yang sederhana dan dalam keadaan normal memiliki efisiensi daya yang tinggi. Namun jika panel surya dalam kondisi cahaya matahari tertutup sebagian teknik P&O memiliki optimisasi daya yang buruk dan efisiensi yang rendah. Sehingga pada *Partially shaded Condition* (PSC) dibutuhkan algoritma optimisasi agar didapat nilai efisiensi daya yang tinggi. Sehingga pada penelitian ini menggunakan algoritma optimisasi *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk pencarian nilai MPP. Dengan menggunakan algoritma PSO diperoleh hasil efisiensi 99,98%, dan menggunakan teknik P&O diperoleh efisiensi kurang dari 90%, sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan algoritma PSO memiliki efisiensi lebih baik.

**Kata Kunci: MPPT, MPP, P&O, PSC, PSO**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***Optimization Photovoltaic Partially Shaded Condition with Maximum Power Point Tracker (MPPT) Using Particle Swarm Optimization (PSO) Double Diode Model Method***

Name Student : Muhammad Irfan Bahrudin  
NRP : 07111545000078  
Supervisor 1 : Prof. Ir. Imam Robandi, MT.  
Supervisor 2 : Dedet Candra Riawan, ST. M.Eng. Ph. D

**ABSTRACT**

*The Photovoltaics system is the main tool in the Solar Power Plant (PLTS). The Photovoltaics system has performance power problems generated. The power generated is often not maximum depending on solar radiation and environmental heat. Therefore we need a method to maximize the power generated by the Photovoltaics System. The method of maximizing the output power of a Photovoltaic System is called the Maximum Power Point Tracker (MPPT). The function of MPPT is to find the maximum point on a solar panel or Maximum Power Point (MPP) that requires an optimization technique or algorithm. The MPP search process on a Photovoltaics System requires an optimization technique or algorithm. In normal condition to look for MPP can use Perturb and Observed (P & O) algorithm. This algorithm is often used because of a simple technique and under normal condition has high power efficiency. But if solar panels are in closed sunlight some P & O techniques have poor power optimization and low efficiency. So that in Partially shaded Condition (PSC) optimization algorithm is needed to obtain high efficiency value of power. So in this research using Particle Swarm Optimization (PSO) optimization algorithm to search MPP value. By using PSO algorithm obtained efficiency of 99,98%, and using P & O technique obtained efficiency less than 90%, so it can be concluded that by using PSO algorithm have better efficiency.*

**Keywords:** MPPT, MPP, P&O, PSC, PSO

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Segala puji kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis dalam usaha dan kerja sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

**“Optimisasi Daya *Photovoltaic* pada kondisi *Partially Shaded* dengan *Maximum Powet Point Tracker* (MPPT) Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) *Double Diode Model*.”**

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan untuk menyelesaikan studi di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Program Studi S1 Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis dengan tulus ikhlas menyampaikan banyak terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan anugerah kesehatan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini hingga selesai.
2. Surti selaku ibu penulis yang selalu memberikan semangat disaat penulis lagi kesulitan, nasehatnya dan doanya sehingga mempermudah semua urusan penulis. (*you are my hero mom*)
3. Musani selaku ayah dari penulis yang selalu mengingatkan penulis bahwa buku ini bukan satu – satu nya karya yang dijadikan patokan kesuksesan ,namun buku ini merupakan salah satu prasasti sejarah yang telah penulis buat untuk kelak ada yang membutuhkan. Kata-kata beliau yang selalu penulis ingat : *”hasil pikiranmu iku kudu onok prasastine mulo gawe karya seng bermanfaat kanggo wong liyo”* .
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. selalu pembimbing pertama penulis yang selalu membimbing dan mengarahkan penulis jika mengalami kesulitan dalam Tugas Akhir ini.
5. Bapak Dedet Candra Riawan, ST. M.Eng. Ph. D. selaku dosen pembimbing kedua penulis dengan segala kesabaran dan kesediaannya meluangkan waktu untuk membimbing serta memberi dukungan sehingga laporan ini dapat terselesaikan dengan baik.

6. Kepada keluarga besar penulis :Muthmainnah S.Ag,M.Pd, Muhaemin, Daimatul Magfiroh S.Pd., Supandri, Alfin syifaul qolbi , dan Muhammad Fathan Azzuhri yang selalu memberikan semangat dikala melewati masa perjuangan dalam mencapai impian.
7. Quota Alief Sias S.T,M.T selaku mentor penulis yang selalu memberikan arahan dan masukan kepada penulis disaat penulis mengalami kendala baik kendala materi maupun kendala sistem.
8. Dwi Lastomo S.Si,M.T selaku mentor penulis yang memberikan saran dan waktu disaat penulis butuh motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
9. Selaku dosen pengajar beserta staf Departemen Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Khususnya dalam lingkup Program Studi Teknik Sistem Tenaga yang memberikan ilmunya kepada penulis yang kelak sebagai bekal di masa yang akan datang.
10. Keluarga Besar asisten Laboratorium PSOC, Bapak mahasiswa S3,S2 teman-teman S1 dan Para Alumni asisten Laboratorium PSOC yang telah menemani penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
11. Teman-teman LJ Power-Computer Control 2015 Terima kasih atas diskusi selama ini yang telah banyak membantu penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
12. Teman-teman XL FUTURE LEADER SCHOLARSHIP BATCH 5 yang selalu menjadi penyemangat penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
13. Keluarga Besar Paguyuban KSE ITS yang selalu memberikan ruang singgah bagi penulis disaat membutuhkan ruang untuk berbagi dan selalu memberikan dukungan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
14. Teman-teman GW25 yang memberikan penulis semangat sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
15. Teman-teman LJ Teknik Elektro 2015 yang telah memberi masukan untuk menunjang tugas akhir ini.
16. Teman-teman KSE Nusantara yang selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini
17. Teman –teman pejuang Sentra-up Technology memberikan motivasi,impian dan dorongan penulis sehingga Tugas Akhir dapat segera selesai.

18. Sahabat Power Ranger : M.R.Ali Fikri, Fikri Fahmi Amrullah, Irwan Sulistiono, dan Andi Hidayat yang selalu memberikan semangat dan doanya sehingga Penulis dapat menyelesaikan Penelitian ini.
19. Manas Zulfikar, Muhammad Zarfan, Debby Priambodo, Catra Herdanis, Aryo Prasetyo Aji, Rahmat R. Raharjo selaku sahabat penulis yang selalu memberikan ruang untuk berdiskusi sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan baik.
20. Para Founder, Donatur, Mentor, Suhu, dan Pegawai Yayasan Karya Salemba Empat selaku pemberi Beasiswa kepada Penulis, pemberi saran dan masukan sehingga Penelitian ini dapat selesai dengan baik.
21. Pegawai tatausaha, ibu kantin, pegawai kebersihan dan petugas parkir yang mendukung penulis dalam segala urusan birokrasi sehingga Penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.
22. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberi dorongan dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis memohon maaf apabila dalam pembuatan maupun penyusunan Tugas Akhir ini banyak terdapat kekurangan. Semoga dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini, dapat bermanfaat kita semua dan mampu menjadi acuan bagi pembaca dalam pengembangan riset dan ilmu pengetahuan di bidang Power Sistem Engineering .

Surabaya, Juli 2018

**Penulis**

*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*



## DAFTAR ISI

LEMBAR	
PERNYATAAN KEASLIAN .....	i
Optimisasi Daya <i>Photovoltaic</i> pada kondisi <i>Partially Shaded</i> dengan <i>Maximum Powet Point Tracker</i> (MPPT) Menggunakan Metode <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO) <i>Double Diode Model</i> . ....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xxi
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL .....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	4
1.5 Metodologi .....	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
1.7 Sistematika Penulisan.....	6
 BAB II DASAR TEORI.....	 7
2.1 Sejarah Fotovoltaik .....	7
2.2 Fotovoltaik .....	7
2.3 Susunan Konfigurasi Fotovoltaik.....	8
2.3.1 <i>Photovoltaic Cell</i> .....	8
2.3.2 Rangkaian equivalent <i>Photovoltaic cell</i> .....	10
2.3.3 Fotovoltaik Modul.....	15
2.3.4 <i>Photovoltaic array</i> .....	16
2.3.4.1 Konfigurasi modul seri .....	17
2.3.4.2 Konfigurasi modul parallel .....	18
2.3.4.3 Konfigurasi modul seri-parallel (SP).....	18
2.3.4.4 Konfigurasi modul <i>Total Cross Tied</i> (TCT) .....	19
2.4 Kurva Karakteristik <i>Photovoltaic</i> .....	20
2.4.1 Kurva Karakteristik <i>Photovoltaic</i> dalam Keadaan normal	20

2.4.2 Kurva Karakteristik Fotovoltaik dalam Keadaan <i>Partially Shading Condition</i> (PSC) .....	22
2.5 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT) .....	24
2.6 Boost Conveter .....	25
2.7 <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	30
2.8 <i>Teknik Perturb and Observe</i> (P&O) .....	34

### **BAB III PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA PARTICLE SWARM OPTIMIZATION .....**

3.1 Metodologi Penelitian .....	38
3.2 Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan .....	40
3.2.1 <i>Pemodelan Photovoltaic</i> .....	41
3.2.2 <i>Pemodelan Photovoltaic array</i> .....	50
3.2.3 <i>Pemodelan Photovoltaic Partially Shading Dengan Bypass dan Blocking Diode</i> .....	51
3.2.4 Pemodelan Boost Converter .....	53
3.2.4.1 Simulasi Boost Converter pada Tegangan Masukan Minimal (60.18 Volt) .....	58
3.2.4.2 Pengujian Boost Converter pada Tegangan Masukan Maksimal (85 Volt) .....	64
3.3 Perancangan MPPT .....	70
3.3.1 <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	70
3.3.2 Skenario Kondisi .....	73
3.3.2.1 Skenario pertama <i>Photovoltaic array</i> (Normal-PSC) .....	74
3.3.2.2 Skenario kedua <i>Photovoltaic array</i> (N-G-PSC) .....	76
3.3.2.3 Skenario ketiga <i>Photovoltaic array</i> (PSC-N-Gberubah) .....	79
3.3.2.4 ..... Skenario keempat <i>Photovoltaic array</i> (N-PSC - Gberubah) .....	81

### **BAB IV HASIL ANALISA DAN SIMULASI .....**

4.1 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Pertama .....	86
4.1.1 Simulasi dan Analisis MPPT Skenario Pertama Menggunakan Algoritma PSO .....	86
4.1.2 Simulasi dan Analisis MPPT Skenario Pertama Menggunakan Algoritma P&O .....	89
4.2 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Kedua .....	92

4.2.1 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Kedua dengan PSO.....	92
4.2.2 Simulasi dan Analisa MPPT Pada Skenario Kedua dengan P&O.....	95
4.3 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Ketiga .....	98
4.3.1 Simulasi dan Analisa MPPT Pada Skenario Ketiga dengan PSO.....	98
4.3.2 Simulasi dan Analisa MPPT Pada Skenario Ketiga dengan P&O .....	101
4.4 Simulasi dan Analisis Pada Skenario Keempat.....	104
4.4.1 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Keempat dengan PSO.....	104
4.4.2 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Keempat dengan P&O.....	106
4.5 Rangkuman Hasil Simulasi .....	110
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>114</b>
5.1 Kesimpulan .....	114
5.2 Saran .....	114
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>116</b>
<b>LAMPIRAN 1 : Datasheet Panel Surya.....</b>	<b>118</b>
<b>LAMPIRAN 2 : Datasheet Baterai.....</b>	<b>120</b>
<b>DAFTAR INDEX.....</b>	<b>122</b>
<b>RIWAYAT PENULIS.....</b>	<b>126</b>

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Atom Silikon .....	8
Gambar 2.2 (A) Stuktur Atom Boron , (B) Struktur Atom Fosfor .....	8
Gambar 2.3 Struktur Ikatan Atom Silikon Yang Dichelup .....	9
Gambar 2.4 Skema Cara Kerja Photovoltaic Cell.....	10
Gambar 2.5 Rangkain Equivalensi Ideal Photovoltaic Cell. ....	11
Gambar 2.6 Rangkaian Equivalensi <i>Single Diode Model</i> (SDM).....	11
Gambar 2.7 Rangkaian Equivalensi <i>Photovoltaic Cell</i> DDM.....	12
Gambar 2.8 Rangkaian Equivalensi <i>Photovoltaic Cell Ideal</i> DDM.....	14
Gambar 2.9 Modul <i>Photovoltaic</i> Dengan 4x9 Cell Dengan <i>Bypass Diode</i> .....	16
Gambar 2.10 Konfigurasi Modul <i>Photovoltaic</i> Secara Seri .....	17
Gambar 2.11 Konfigurasi Fotovoltaik Yang Dipasang Secara Paralel	18
Gambar 2.12 Konfigurasi Array <i>Photovoltaic</i> Modul Secara Seri- Paralel.....	19
Gambar 2.13 Konfigurasi Array Photovoltaic Modul Total Cross Tied	20
Gambar 2.14 Kurva I-V Dan P-V (Kurva Karakteristik) Saat Keadaan Normal.....	21
Gambar 2.15 Kurva Karakteristik (A) Kurva I-V, (B) Kurva P-V Pada PSC.....	22
Gambar 2.16 Kurva Karakteristik (A) Kurva I-V ,(B) Kurva P-V Pada Nilai Radiasi Dan Suhu Tertentu [5] .....	23
Gambar 2.17 <i>Open Circuit Voltage</i> Dan <i>Short Circuit Current</i> .....	24
Gambar 2.18 Rangkaian Boost Converter.....	25
Gambar 2.19 Boost Converter Kondisi Saklar Terhubung .....	26
Gambar 2.20 Boost Converter Kondisi Saklar Tidak Terhubung .....	26
Gambar 2.21 Sinyal Arus Pada Induktor .....	27
Gambar 2.22 Sinyal Arus Pada Capacitor Terhadap Waktu .....	28
Gambar 2. 23 Sinyal Ripple Kapasitor Terhadap Waktu .....	29
Gambar 2.24 Sinyal Tegangan Induktor Terhadap Waktu.....	29
Gambar 2.25 Sinyal Arus Pada Dioda Terhadap Waktu.....	29
 Gambar 3.1 Alur Metodologi Penelitian .....	 39
Gambar 3.2 Pemodelan Sistem secara keseluruhan .....	40
Gambar 3. 3 Implementasi Simulasi Sistem secara keseluruhan .....	41

Gambar 3. 4 Rangkaian pengganti ideal double diode model .....	42
Gambar 3. 5 Implementasi simulasi rangkaian pengganti <i>ideal double diode model</i> .....	42
Gambar 3. 6 Flowchart mencari parameter $A_2$ double diode model .....	45
Gambar 3. 7 Grafik karakteristik (a).Grafik karakteristik Fotovoltaik I-V.(b) Grafik karakteristik Fotovoltaik P-V .....	47
Gambar 3. 8 Kurva karakteristik V-I pada berbagai nilai irradiance yang berbeda dari $100 \text{ W/m}^2$ sampai $1000 \text{ W/m}^2$ .....	49
Gambar 3. 9 Kurva karakteristik P-V pada berbagai nilai irradiance dari $100 \text{ W/m}^2$ sampai $1000 \text{ W/m}^2$ .....	49
Gambar 3. 10 Pemodelan <i>Photovoltaic array</i> .....	50
Gambar 3. 11 <i>Photovoltaic cell</i> yang mengalami partially shading condition.....	51
Gambar 3. 12 Cara kerja <i>blocking diode</i> .....	52
Gambar 3. 13 Simulasi boost converter di Simulink Matlab .....	53
Gambar 3. 14 Grafik pengukuran array photovoltaic (a) ketika $G = 100 \text{ W/m}^2$ , (b) ketika $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .....	55
Gambar 3. 15 Simulasi Boost Converter dengan sumber Tegangan minimal .....	58
Gambar 3. 16 Sinyal arus induktor terhadap waktu .....	59
Gambar 3. 17 Sinyal tegangan induktor terhadap waktu .....	60
Gambar 3. 18 Sinyal arus kapasitor terhadap waktu.....	60
Gambar 3. 19 Sinyal Tegangan kapasitor terhadap waktu.....	61
Gambar 3. 20 Grafik Arus pengujian dan Arus ripple boost converter .	62
Gambar 3. 21 Grafik Tegangan dan ripple tegangan pengujian boost converter.....	63
Gambar 3. 22 Pengujian Boost Converter dengan sumber Tegangan maksimal .....	64
Gambar 3. 23 Sinyal arus induktor terhadap waktu .....	65
Gambar 3. 24 Sinyal Tegangan induktor terhadap waktu.....	66
Gambar 3. 25 Sinyal arus kapasitor terhadap waktu.....	67
Gambar 3. 26 Sinyal tegangan kapasitor terhadap waktu .....	67
Gambar 3. 27 Grafik Arus pengujian dan Arus ripple boost converter .	69
Gambar 3. 28 Grafik Tegangan dan ripple tegangan pengujian boost converter.....	70
Gambar 3. 29 <i>Flowchart Particle Swarm Optimization</i> .....	72

Gambar 3. 30 Photovoltaic array PSC pada skenario pertama.....	74
Gambar 3. 31 Kurva karakteristik Photovoltaic array pada PSC skenario pertama.....	75
Gambar 3. 32 Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu .....	76
Gambar 3. 33 <i>Photovoltaic array</i> PSC pada skenario kedua.....	77
Gambar 3. 34 Kurva karakteristik Photovoltaic array pada PSC skenario kedua .....	78
Gambar 3. 35 Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu .....	78
Gambar 3. 36 Photovoltaic array PSC pada skenario ketiga.....	79
Gambar 3. 37 Kurva karakteristik Photovoltaic array pada PSC skenario ketiga.....	80
Gambar 3. 38 Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu .....	81
Gambar 3. 39 Photovoltaic array PSC pada skenario keempat .....	82
Gambar 3. 40 Kurva karakteristik Photovoltaic array PSC pada skenario keempat .....	83
Gambar 3. 41 Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu .....	84
Gambar 4. 1 Kurva Daya Tracking Algoritma PSO Pada Skenario pertama .....	87
Gambar 4. 2 <i>Dutycycle</i> Algoritma PSO Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT.....	88
Gambar 4. 3 Kurva Daya Tracking Algoritma P&O Pada Skenario Pertama .....	89
Gambar 4. 4 <i>Dutycycle</i> Algoritma P&O Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT.....	91
Gambar 4. 5 Kurva Daya Tracking MPPT PSO Dan P&O Pada Skenario Pertama.....	92
Gambar 4. 6 Kurva Daya Tracking Algoritma PSO Pada Skenario Kedua.....	93
Gambar 4. 7 <i>Dutycycle</i> Algoritma PSO Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT.....	94

Gambar 4. 8 Kurva Daya Tracking Algoritma P&O Pada Skenario Kedua .....	95
Gambar 4. 9 <i>Dutycycle</i> Algoritma P&O Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT .....	97
Gambar 4. 10 Kurva Daya Tracking MPPT PSO Dan P&O Pada Skenario Kedua .....	98
Gambar 4. 11 Kurva Daya Tracking Algoritma PSO Pada Skenario Ketiga .....	99
Gambar 4. 12 <i>Dutycycle</i> Algoritma PSO Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT .....	100
Gambar 4. 13 Kurva Daya Tracking Algoritma P&O Pada Skenario Ketiga .....	101
Gambar 4. 14 <i>Dutycycle</i> Algoritma P&O Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT .....	103
Gambar 4. 15 Kurva Daya Tracking MPPT PSO Dan P&O Pada Skenario Ketiga .....	104
Gambar 4. 16 Kurva Daya Tracking Algoritma PSO Pada Skenario Keempat .....	105
Gambar 4. 17 <i>Dutycycle</i> Algoritma PSO Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT .....	106
Gambar 4. 18 Kurva Daya Tracking Algoritma P&O Pada Skenario Keempat .....	107
Gambar 4. 19 <i>Dutycycle</i> Algoritma P&O Yang Dihasilkan Oleh Sistem MPPT .....	109
Gambar 4. 20 Kurva Daya Tracking MPPT PSO Dan P&O Pada Skenario Keempat .....	110



## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Modul PV GH80P-18 3 .....	47
Tabel 3. 2 Pengukuran Kondisi Array PV.....	54
Tabel 3. 3 Spesifikasi boost converter .....	57
Tabel 3. 4 Parameter <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	73
Tabel 4. 1 Hasil Samulasi Keseluruhan Sistem.....	111

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

### SINGKATAN

Eff	Efisiensi
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
Np	Jumlah Particle
P&O	<i>Perturb and Observe</i>
PSO	<i>Particle swarm optimization</i>
P <sub>max</sub>	Daya maksimum
PSC	<i>Partial Shading Condition</i>
STC	<i>Standard Test Condition</i>
V <sub>omax</sub>	Tegangan <i>output</i> maksimal
V <sub>omin</sub>	Tegangan <i>output</i> minimal
N –PSC	Perubahan irradiant dari Normal ke PSC
N- G-PSC	Perubahan irradiant berturut-turut Normal, Irradiant berubah, lalu PSC
PSC-N-G.berubah	Perubahan irradiant berturut-turut PSC, Normal, lalu Irradiant berubah
N-PSC-G.berubah	Perubahan irradiant berturut-turut Normal, PSC lalu Irradiant berubah

### SIMBOL

A <sub>1</sub>	Konstanta ideal dioda 1
A <sub>2</sub>	Konstanta ideal dioda 2
C	capasitor
C <sub>1</sub>	<i>Cognitive learning factor</i>
C <sub>2</sub>	<i>Social learning factor</i>
D	<i>Duty cycle</i>
G	Radiasi Sinar Matahari
G <sub>B</sub>	<i>Global best position particle</i>
G <sub>STC</sub>	Irradiant dalam kondisi standart (1000 Watt/m <sup>2</sup> )
I	Arus listrik
I <sub>sc</sub>	Arus <i>Short Circuit</i>
I <sub>ph</sub>	Arus <i>photovoltaic</i>

$I_s$	Arus saturasi dioda
$I_{rs}$	Arus saturasi dioda pada STC
$I_{01}$	<i>Reverse Saturation Current</i> dioda 1
$I_{02}$	<i>Reverse Saturation Current</i> dioda 2
$I_{mp}$	Arus puncak maksimum
$I_{mpn}$	Arus puncak maksimum saat keadaan normal
$K$	Konstanta Boltzmann
$K_i$	Konstanta temperatur saat $I_{sc}$ sesuai datasheet
$K_v$	Konstanta temperatur saat $V_{oc}$ sesuai datasheet
$L$	Induktor
$LB_i$	<i>Local best position particle i.</i>
$N_s$	Jumlah sel surya terpasang seri
$P$	Daya listrik
$q$	Muatan Elektron
$T$	Temperatur
$V$	Tegangan
$V_{oc}$	Tegangan <i>Open Circuit</i>
$V_{ocn}$	Tegangan <i>Open Circuit</i> pada keadaan normal
$V_s$	Tegangan sumber
$V_T$	Tegangan termal pada modul Fotovoltaik
$\Delta V_o$	<i>Ripple</i> Tegangan
$V_o$	Tegangan <i>output</i>
$\omega$	Inersia
$V_{mp}$	Tegangan puncak maksimum
$V_{mpn}$	Tegangan puncak maksimum pada keadaan normal
$V_i$	Kecepatan particle
$R_{sh}$	Resistor shunt
$R_s$	Resistor series

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Berdasarkan Perpres No.5 Tahun 2006 tentang kebijakan Energi Nasional, negara Indonesia memiliki potensi energi terbarukan (EBT) yang cukup besar. Pada perpres disebutkan EBT energi primer nasional tahun 2025 adalah sebesar 17%, 5 % diantaranya adalah energi air dan surya. Pada tahun 2035, *International Energy Agency* (IEA) memprediksi energi terbarukan menyumbang hampir sepertiga dari total kebutuhan listrik dan energi matahari tumbuh lebih cepat dibandingkan teknologi terbarukan lainnya. Mengingat wilayah Negara Indonesia yang beriklim tropis dan secara geografis dilalui garis katulistiwa dengan interval penyinaran matahari relative ,maka memaksimalkan PLTS merupakan langkah yang strategi[1]. Diantaranya langkah pemerintah untuk menambah kapasitas pembangkit listrik pada tahun 2024 merencanakan akan menambah energi listrik tenaga surya PLTS sebesar 0.87 GigaWatt.

Sistem Fotovoltaik sebagai alat utama yang terdapat di PLTS memiliki permasalahan pada performa daya yang dihasilkan. Daya yang dihasilkan seringkali tidak maksimum dan tidak stabil tergantung pada panas dan radiasi matahari. Oleh karena itu diperlukan sebuah metode untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh Fotovoltaik [2]. Metode disebut adalah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT merupakan sebuah metode untuk memaksimalkan daya keluaran Fotovoltaik (pv) dengan menggunakan perhitungan maupun algoritma penjajak. Algoritma penjajak bervariasi dalam kompleksitas, beban perhitungan, efektivitas, implementasi perangkat keras, popularitas, dan kecepatan konvergensi[2]. Hasil dari Algoritma penjajak dalam sistem MPPT ini berupa *duty cycle*. *Duty cycle* adalah perbandingan antara waktu nyala saklar dibanding dengan periode (T) system. *Duty cycle* disalurkan ke converter guna mengatur kerja dari converter tersebut. Salah satu algoritma MPPT adalah *Particle Swam Optimization* (PSO) [3].

Optimisasi MPPT menggunakan *Particle Swam Optimization* (PSO) Algorithm merupakan metode pemrograman digunakan untuk memaksimalkan output daya agar berada pada daerah maksimum (*Maximum Power Point*). Perhitungan nilai *Maximum Power Point*

(MPP) berdasarkan simulasi model. Standart modeling pv sistem dirubah kedalam persamaan elektrik . Salah satu pemodelan pv yang sering dipakai adalah *single diode model*. *Single diode model* dengan menggunakan Resistansi shunt ( $R_{sh}$ ) dan Resistansi series ( $R_s$ ). Menjadikan pemodelan lebih akurat. Namun *single diode model* tidak mempertimbangkan losses rekomendasi carrier pada daerah deplesi. Untuk mengurangi kompleksitas persamaan, beberapa model mengabaikan Resistansi shunt ( $R_s$ )[4]. Meskipun kompleksitas berkurang, model ini menunjukkan penyimpangan dalam I-V karakteristik pada beberapa variasi suhu tentu. Sehingga dibutuhkan persamaan tambahan untuk mendapatkan persamaan arus pada Fotovoltaik[5].

Keakuratan model semakin meningkat jika menggunakan double diode model dengan memperhitungkan losses rekombinasi. Peningkatan akurasi terjadi dengan menggunakan parameter  $R_{sh}$  dan  $R_s$ . Pemodelan diskripsikan dengan memiliki arus reverse saturasi pada persamaan kedua dioda dan konstanta diode ideal menggunakan konstanta diode ideal 1 dan konstanta diode ideal 2 , dengan tujuan untuk mengurangi jumlah parameter. Namun ternyata asumsi nilai konstanta ideal diode tidak selalu benar. Sehingga dibutuhkan pemodelan Fotovoltaik yang baru dengan memiliki keuntungan lebih simpel , pemodelan yang mudah dan lebih akurat [6].

Pada tugas akhir ini diusulkan pemodelan Fotovoltaik ideal double diode model. Model Fotovoltaik ini memiliki kelebihan mampu mengurangi waktu komputasi dan pemodelan dua diode yang lebih simpel dengan tidak mempertimbangkan resistansi series dan resistansi shunt.

Optimisasi MPPT menggunakan *Particle Swam Optimization Algorithm* (PSO). PSO merupakan metode `digunakan untuk memaksimalkan output daya agar berada pada daerah maksimum (*Maximum Power Point*). Parameter *PSO Algorithm* akan diatur sedemikian rupa sehingga untuk mencapai titik *MPP* dengan waktu yang relative cepat . *Particle Swam Optimization* (PSO) Algorithm ditemukan terinspirasi dari tingkah laku burung yang berkelompok dengan pengetahuan lingkungan masih sedikit saat mencari makanan. Dan kemudian setiap objek disederhanakan menjadi sebuah partikel. Suatu partikel dalam ruang memiliki posisi yang dikodekan sebagai vector koordinat. Kelebihan dari PSO memiliki performa yang lebih bagus dari pada P&O saat PSC [7]. Panel surya saat PSC memiliki beberapa Puncak

daya lokal dan satu puncak maksimal, sehingga dibutuhkan algoritma penjajak untuk mencapai puncak daya maksimal. Algoritma P&O memiliki performa yang baik saat kondisi normal, namun P&O akan terjebak pada solusi lokal saat PSC[8].

Perbandingan Fotovoltaik saat keadaan normal dan *Partially shade Condition* (PSC) terlihat dari kurva I-V dan V-P karakteristik. Fotovoltaik pada keadaan normal hanya memiliki satu puncak. Sedangkan Fotovoltaik pada PSC memiliki lebih dari satu puncak. Puncak kurva paling besar cenderung lebih pendek dari pada kurva Fotovoltaik dalam keadaan normal. Puncak PSC lokal terbentuk karena adanya diode bypass pada Fotovoltaik sehingga menjadikan arus diteruskan melawati diode tersebut. *Diode bypass* merupakan peralatan yang penting pada Fotovoltaik karena dapat mencegah pv dari kerusakan akibat tidak dapat mengalirkan arus akibat dari *Partially shade Condition*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Hal yang menjadi permasalahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana menentukan permodelan MPPT dengan *double diode* model yang dioptimisasi menggunakan *Particle Swarm Optimization*.
2. Bagaimana perbandingan daya keluaran antara *Sistem Fotovoltaik* dengan MPPT menggunakan algoritma PSO & P&O dalam berbagai kondisi baik dalam keadaan *partially shading* maupun keadaan normal dalam beberapa kondisi intensitas cahaya matahari yang berbeda.

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. Software yang digunakan MATLAB 2016 A.
2. Beban sistem berupa baterai.
3. MPPT menggunakan metode *Particle Swam Optimization* (PSO).
4. Pemodelan *Photovoltaic* menggunakan *Ideal double diode model*.
5. Faktor *ripple* diabaikan.

6. Faktor rugi daya diabaikan

#### 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini :

1. Menentukan pemodelan MPPT dengan *Double diode model* yang dioptimisasi menggunakan *Particle Swam Optimization*.
2. Mendapatkan perbandingan daya keluaran antara Sistem Fotovoltaik dengan MPPT di berbagai kondisi baik dalam keadaan *partially shading* maupun keadaan normal dalam beberapa kondii intensitas cahaya matahari yang berbeda.

#### 1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

##### 1. Studi literatur dan pengumpulan.

Melakukan studi literatur dan pengumpulan dari jurnal IEEE mengenai Sistem Fotovoltaik. Data-data yang diperoleh digunakan untuk membuat pemodelan Fotovoltaik dan parameter *Boost converter*.

##### 2. Pemodelan sistem

Setelah proses pengumpulan data langkah berikutnya mendesain Sistem Fotovoltaik, dan boost converter. Desain sistem dibuat dengan software MATLAB Simulink. Sistem dibuat dengan dua jenis optimisasi yaitu dengan PSO algorithm dan dengan Perturb and Observe (P&O). Pemrograman PSO Algorithm dan Perturb and Observe (P&O) dilakukan pada MATLAB M-file, dan hasil progam dihubungkan ke MATLAB Simulink untuk melakukan simulasi sistem secara keseluruhan. PSO berfungsi untuk menala parameter PV agar mendapatkan nilai MPPT maksimum. Dengan adanya intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah akan menyebabkan daya keluaran yang berubah-ubah pula. Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh perbandingan antara daya keluaran Sistem Fotovoltaik *partially shading* menggunakan PSO Algorithm dengan menggunakan *Perturb and Observe* (P&O) pada intensitas cahaya matahari dan nilai beban yang berbeda-beda.



### **3. Analisa Data**

Setelah mendesain sistem didapat data perbandingan antara PSO Algorithm dengan *Perturb and Observe* (P&O). Selanjutnya dilakukan Analisa data perbandingan antara kedua Algoritma tersebut.

### **4. Penarikan Kesimpulan**

Dari hasil analisa data dari running program yang dilakukan, penulis dapat menarik kesimpulan yang merupakan jawaban dari permasalahan.

### **5. Penulisan Buku**

Penulisan buku merupakan tahap akhir proses penelitian, penulisan buku berupa hasil analisis dari permasalahan dan disusun dalam bentuk buku Tugas Akhir.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Penulisan laporan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu :

#### **1. BAB I : PENDAHULUAN**

Bab ini membahas tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan tugas akhir dan sistematika penulisan laporan serta relevansi dari Tugas Akhir.

#### **2. BAB II : DASAR TEORI**

Pada bab ini menjelaskan dasar teori yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

#### **3. BAB III : PEMODELAN SISTEM METODE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**

Pada bab ini menjelaskan tentang system pemodelan *Photovoltaic system* menggunakan algoritma PSO disimulasikan menggunakan Matlab dengan fitur Simulink

#### **4. BAB IV : HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

Bab ini membahas mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan.

#### **5. BAB V : PENUTUP**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil simulasi, studi literatur, dan analisis yang telah dilakukan.

### **1.7 Sistematika Penulisan**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan system kelistrikan, khususnya bagi kelistrikan bersifat *renewable Energy*. Hasil yang diperoleh juga berguna untuk meningkatkan penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang sistem tenaga. Selain itu hasil dari penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi mahasiswa yang mengambil penelitian tentang Sistem Fotovoltaik.

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

Fotovoltaik merupakan salah satu dari beberapa macam teknologi dibidang *renewable energy* yang *reliable*, ramah lingkungan dan membutuhkan biaya yang rendah jika dibandingkan dengan harga bahan bakar generator konvensional. Selain itu Fotovoltaik tidak membutuhkan pemeliharaan yang rumit sehingga biaya untuk pemeliharaan pun juga relatif murah. Namun untuk mendapatkan optimisasi daya yang dihasilkan oleh Fotovoltaik dibutuhkan peralatan kontrol yang memadai supaya daya keluaran Fotovoltaik dapat maksimal walaupun itu dalam keadaan gangguan. Fotovoltaik saat terjadi gangguan misalnya dalam keadaan *partially shading* menyebabkan keeluaran daya dari Fotovoltaik dapat maksimal, sehingga sistem kontrol perlu dikombinasikan dengan menggunakan metode tiruan cerdas (*artificial Intellegent* ).

#### **2.1 Sejarah Fotovoltaik**

Pembuatan Fotovoltaik mengalami perkembangan dari masa ke masa. Pada akhir abad ke-19 fenomena mengenai cahaya yang dapat menimpa sel cair sehingga menghasilkan arus listrik telah diamati namun tidak diperoleh penjelasan lebih lanjut . Pemanfaatan tenaga listrik dari cahaya matahari pertama kali ditemukan oleh Alexandre Edmund Becquerel seorang ahli fisika Prancis pada tahun 1839. Pada awal abad ke-20 Albert Einstein menemukan teori terhadap fenomena serupa yaitu “efek fotovoltaik ”, yang menjelasannya menjadi dasar untuk teori yang sering dikenal “efek voltaik” . Sehingga kerana penemuan itu Einstein menerima nobel dalam bidang fisika.

Pada efek fotovoltaik, bahwa cahaya itu sendiri terdiri dari “foton” atau partikel dari cahaya, bila foton foton menimpa sebuah logam maka, beberapa diantaranya dapat menendang keluar electron dari atom-atom logam mirip dengan bola bilyar yang menerjang bola yang lain bila berbenturan .

#### **2.2 Fotovoltaik**

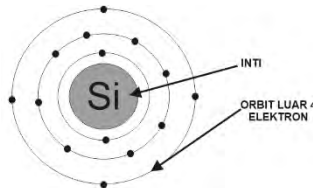
Fotovoltaik merupakan peralatan yang dapat mengubah energi cahaya radiasi matahari menjadi energi listrik. Bahan utama penyusun

dari Fotovoltaik adalah semikonduktor yang bahannya sama terdapat pada dioda. Bahan yang paling umum digunakan dalam produksi Fotovoltaik adalah kristal silikon yang dimurnikan.

## 2.3 Susunan Konfigurasi Fotovoltaik

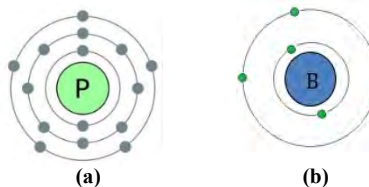
### 2.3.1 *Photovoltaic Cell*

*Photovoltaic Cell* merupakan komponen dasar yang terdapat pada *Photovoltaic module*. *Photovoltaic Cell* yang terbuat dari kristal silikon sebagai penghantar semu, yaitu suatu zat yang dapat menjadi penghantar dan sekaligus penyekat yang terdapat pada Gambar 2.1.



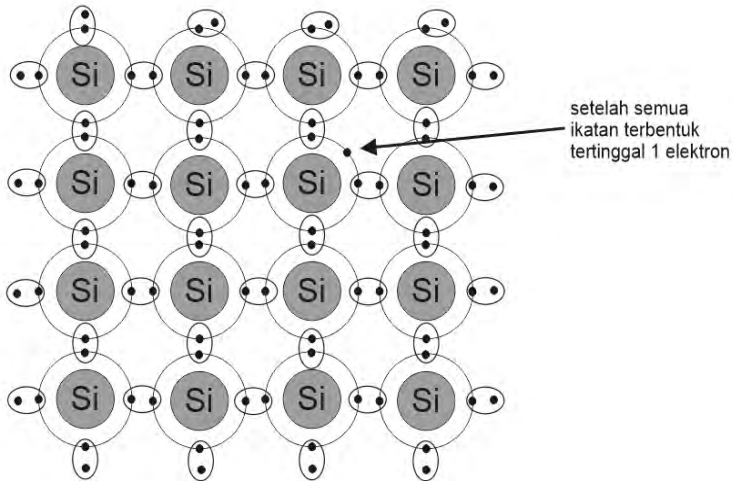
**Gambar 2.1** Struktur atom silikon

Pada silikon ditambah dua bahan yang tidak murni (*dopants*) yang berfungsi merubah sifat kelistrikan. Pertama adalah Boron (B) yang memiliki tiga elektro luar dan fosfor (P). Ketika atom-atom boron mengkristal bersama dengan silikon yang memiliki ikatan tidak lengkap, yaitu memiliki tiga electron luar guna berbagi dengan ikatan electron tetangga. Sehingga susunan kristal kekurangan sebuah electron maka menjadikan bermuatan *p* (*p*=positif)[4]. Pencampuran lain (*dopant*) yang dipakai adalah fosfor (P) , yang terdapat pada Gambar 2.2



**Gambar 2.2** (a) Stuktur atom Fosfor, (b) Struktur atom Boron

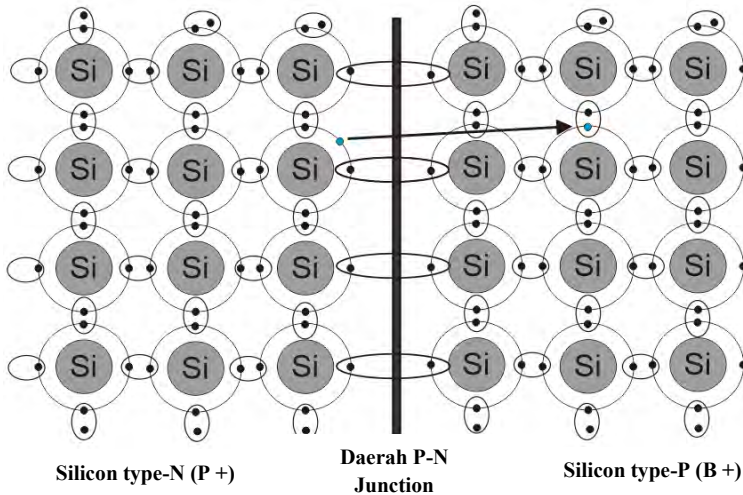
Atom fosfor yang memiliki 5 elektron luar dan membentuk empat ikatan electron, maka masing – masing memiliki kelebihan satu elektron yang bergerak bebas dalam susunan kristal. Kelebihan elektron- elektron bebas yang masing–masing memiliki muatan *negative*. Sehingga tipe silikon yang dicelup (*doped*) dinamakan tipe N ( $N= negative$ ) yang terdapat pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Struktur ikatan atom silikon yang dicelup

Prinsip kerja kerja *Photovoltaic cell* berdasarkan konsep semikonduktor *p-n junction*. Ketika kedua semikonduktor itu digabung fosfor berada dipermukaan Fotovoltaik dan boron berada di dasar Fotovoltaik. Elektron dari semikonduktor *n* bersatu dengan *hole* pada semikonduktor *p*. Hal ini menyebabkan jumlah *hole* pada semikonduktor *p* berkurang sehingga menjadikan daerah ini bermuatan negatif. Begitu pula dengan semikonduktro *n* mengakibatkan jumlah electron pada daerah ini jarang sehingga daerah ini bermuatan positif. Daerah pertemuan antara muatan positif dan negatif disebut sebagai daerah deplesi (*deplesi region*) atau *junction*. Proses ini berlangsung sampai daerah muatan negative menjadi cukup kuat untuk menolak electron yang datang melintas. Medan listrik yang terbentuk karena pemisahan ini tinggal dalam tiap sel, yaitu tepat dibawah permukaan. Keadaan ini akan

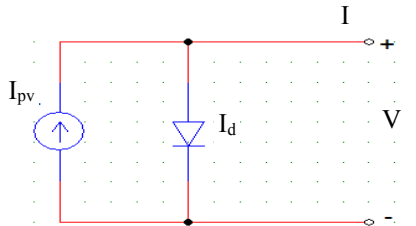
membantu mengalirkan arus bila cahaya matahari menyinari sel [4]. Skema cara kerja *Photovoltaic cell* ditunjukkan pada Gambar 2.4



**Gambar 2.4** Skema cara kerja *Photovoltaic cell*

### 2.3.2 Rangkaian equivalent *Photovoltaic cell*

*Photovoltaic cell* yang cara kerjanya sudah dijelaskan pada subbab 2.3.1 diatas dapat direpresentasikan menjadi rangkaian equivalent. Rangkaian equivalent adalah merepresentasikan proses fisik dan elektrik pada Fotovoltaik ke bentuk rangkaian listrik. Rangkaian equivalent digunakan untuk memodelkan *Photovoltaic cell* supaya memudahkan seseorang untuk membayangkan cara kerja berdasarkan kharakteristik dari *Photovoltaic cell*. Rangkain equivalensi ideal terdiri dari sumber arus yaitu pengganti sinar matahari dinyatakan dalam Irradiant. Sumber arus diparalel dengan diode yang merepresentasikan bahwa Fotovoltaik terbuat dari bahan yang sama dengan diode yaitu dari bahan semiconductor. Rangkaian equivalent terdapat pada Gambar 2.5. Pada gambar tersebut terdapat parameter  $I_{pv}$  sebagai sumber arus,  $I_d$  merupakan Arus pada diode,  $I$  adalah arus output dari *Photovoltaic cell* yang akan disapply ke beban. Namun pada kenyataannya tidak ada Fotovoltaik yang ideal.

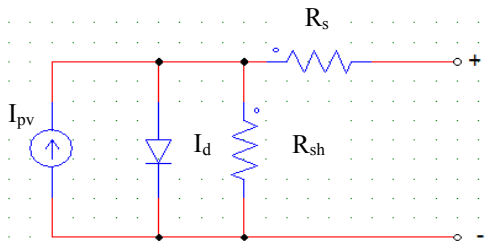


**Gambar 2.5** Rangkain equivalensi ideal *Photovoltaic cell*.

Untuk mendapatkan pomedalan yang sesuai dengan keadaan real,biasanya pemodelannya ditambah dengan resistor yang diparalel dengan diode ( $R_{sh}$ ) untuk mengatasi adanya *short circuit* pada *Photovoltaic cell*, dan resistor seri ( $R_s$ ) untuk mendeskripsikan resistansi internal pada Fotovoltaik [9]. berdasarkan jumlah diode dalam pemodelan *Photovoltaic cell* dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu:

### 2.3.2.1 *Single diode model (SDM)*

*Single diode model* merupakan pemodelan Fotovoltaik dengan satu buah diode yang diparalel dengan sumber arus dan  $R_{sh}$  ditunjukkan Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Rangkaian equivalensi *Single diode Model (SDM)*

Rangkaian equivalensi *single diode model* ditunjukkan pada Gambar 2.6 banyak digunakan pada pemodelan Fotovoltaik karena lebih sederhana. Pemodelan *single diode model (SDM)* memiliki kelebihan dibanding dengan *double diode model*, yaitu parameter yang diketahui lebih sedikit dibanding dengan pemodelan *double diode model* maka dalam kecepatan perhitungan data lebih cepat. Namun SDM juga memiliki kelemahan yaitu pada variasi suhu tertentu dengan irradiansi sama sdm memiliki % error daya maksimum yang lebih besar[8][10].

Rangkaian pengganti pada *single diode model* pada Gambar 2.6 menghasilkan persamaan 2.1 sampai dengan persamaan 2.6 dengan beberapa parameter yang tidak diketahui.

$$I = I_{pv} - I_D - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad \text{.....(2. 1)}$$

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \quad \text{.....(2. 2)}$$

$$V_T = \frac{N_S K T}{q} \quad \text{.....(2. 3)}$$

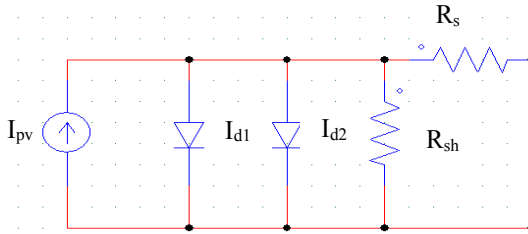
$$V_{oc} = V_{ocn} + V_T \ln\left(\frac{G}{G_{STC}}\right) + K_v \Delta T + A_1 \log\left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \quad \text{.....(2. 4)}$$

$$V_{mp} = V_{mpn} + V_T \ln\left(\frac{G}{G_{STC}}\right) + K_v \Delta T + A_2 \log\left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \quad \text{.....(2. 5)}$$

$$I = N_p \left\{ I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_T N_S}\right) - 1 \right] \right\} - \left( \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad \text{.....(2. 6)}$$

### 2.3.2.2 Double diode model (DDM)

*Double diode model* merupakan pemodelan Fotovoltaik dengan dua buah diode yang diparalel dengan sumber. Rangkaian *double diode model* memperhitungkan efek rekombinasi dengan memparalel dua diode dalam satu circuit, sehingga dengan memparalel dua buah diode . Pemodelan dapat mendekati dengan keadaan yang sebenarnya. Rangkaian *equivalen double diode model* ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Rangkaian eqivalensi *Photovoltaic cell* DDM

*Double diode model* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 memiliki lima parameter yang harus diketahui. Sehingga untuk mencari beberapa parameter memerlukan proses komputasi yang lebih lama. Namun dalam kondisi nilai iradiasi yang rendah dan temperatur yang



rendah , *double diode model* memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi dari pada dibandingkan dengan *single diode model*. Pada persamaan gambar 2.7 terdapat  $R_s$  merupakan *internal resistive losses* dan  $R_{sh}$  merepresentasikan kebocoran arus di P-N *junction* dan besarnya bervariasi sesuai dengan metode fabrikasi yang berbeda.

Rangkaian pengganti pada *double diode model* pada Gambar 2.7 menghasilkan persamaan 2.7 sampai dengan persamaan 2.12 dengan beberapa parameter yang tidak diketahui.

$$I = I_{pv} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad \text{.....(2. 7)}$$

$$I_{D1} = I_{O1} \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{N_1 N T_1}\right) - 1 \right] \quad \text{.....(2. 8)}$$

$$I_{D2} = I_{O2} \left[ \exp\left(\frac{V+IR_s}{N_2 N T_2}\right) - 1 \right] \quad \text{.....(2. 9)}$$

$$V_{T1} = N_1 x \frac{N_s + KT}{q} \quad \text{.....(2. 10)}$$

$$V_T = N_2 x \frac{N_s + KT}{q} \quad \text{.....(2. 11)}$$

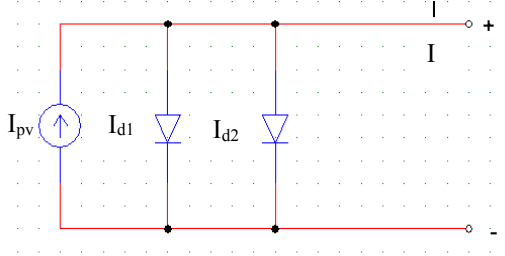
$$I_{sh} = \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad \text{.....(2. 12)}$$

Rangkaian pengganti *double diode model* memiliki kelebihan yaitu memperbaiki akurasi dari efek arus yang hilang di daerah deplesi. Dengan dua dioda model yang salah satu merupakan proses difusi dan yang lain berhubungan dengan carrier rekombinasi pada jarak daerah *junction* [11].

### 2.3.2.3 Ideal Double diode model (IDDM)

*Double diode model* merupakan pemodelan Fotovoltaik dengan dua buah diode yang diparalel dengan sumber. Rangkaian *ideal double diode* model memperhitungkan efek rekombinasi dengan memparalel dua diode dalam satu circuit, sehingga dengan memparalel dua buah diode ,pemodelan dapat mendekati dengan keadaan yang sebenarnya. Pada Gambar 2.8 diode satu ( $I_{d1}$ ) merepresentasikan proses difusi antara atom Fosfor dan atom Boron. Sedangkan untuk diode dua ( $I_{d2}$ ) merepresentasikan rekombinasi carier pada jarak daerah *junction*. Pengertian dari efek rekomendasi adalah Suatu electron kehilangan energi dalam bentuk pancaran photon dan bertemu hole peristiwa disebut

rekombinasi, pada saat rekombinasi terjadi maka hilanglah suatu pasangan electron-hole sebagai pembawa muatan dalam semikonduktor



**Gambar 2.8** Rangkaian ekuivalensi *Photovoltaic cell* ideal DDM

*Ideal double diode model* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 memiliki dua parameter yang harus diketahui *Series Resistance* ( $R_s$ ) dan *shunt Resistance* ( $R_{sh}$ ) diabaikan. Kelebihan *ideal double diode model* dibandingkan dengan *double diode model* memiliki proses komputasi yang lebih cepat karena parameter yang dihitung tidak sebanyak parameter *double diode model*. Walaupun mengabaikan nilai *Resistance Series* ( $R_s$ ) dan *shunt Resistance ideal double diode model* memiliki tingkat akurasi yang tinggi [3].

Rangkaian pengganti pada Gambar 2.8 menghasilkan persamaan 2.13 dengan tiga nilai parameter yang tidak diketahui yaitu  $I_{ph}$ ,  $A_1$ , dan  $A_2$ .

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{N_s A_1 K T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{N_s A_2 K T}\right) - 1 \right] \dots\dots(2.13)$$

Parameter  $I_{pv}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  adalah besaran yang bergantung dari nilai radiasi matahari dan suhu lingkungan. Nilai  $I_{pv}$  diperoleh melalui persamaan (2.14),  $I_{01}$  diperoleh melalui persamaan (2.15) sedangkan  $I_{02}$  diperoleh dari persamaan (2.16)

$$I_{PV} = (I_{SC} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I_{01} = \frac{(I_{SC} - K_i \Delta T)}{\exp\left[\frac{(V_{oc} + K_i \Delta T) * q}{(N_s K T A_1)}\right] - 1} \dots\dots\dots (2.15)$$

Nilai  $I_{02}$  memiliki nilai tiga sampai empat kali lebih besar dari pada  $I_{01}$  [3].

$$I_{02} = \left( \frac{(T)^2}{3.77} \right) I_{01} \quad \dots\dots (2. 16)$$

$$A_2 = \frac{(qV_{oc})}{N_s TK \ln \left[ \frac{I_{pv} - (I_{01} (\exp(qV/(N_s KA_1 T)) - 1))}{I_{02}} + 1 \right]} \quad \dots\dots(2. 17)$$

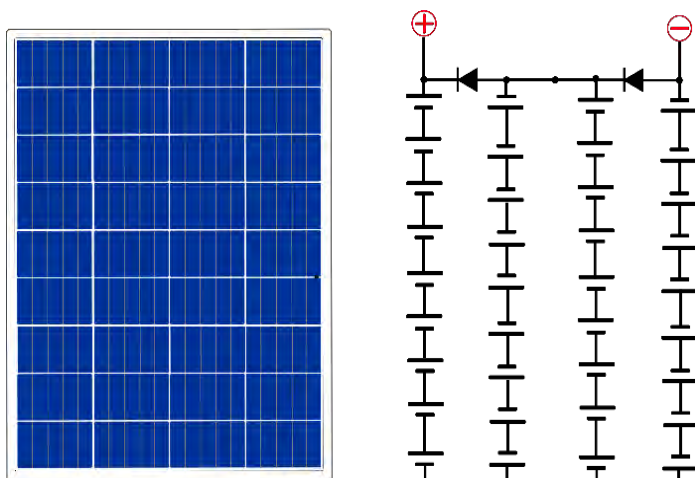
Keterangan:

- I : Arus *Photovoltaic* modul dalam ampere
- K : Konstanta Boltzman (  $1,38 \times 10^{-23} \text{Nm/K}$ )
- q : *Electron charge* ( $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ )
- $I_{01}$  : *Reverse Saturation Current* dioda 1
- $I_{02}$  : *Reverse Saturation Current* dioda 2
- T :Temperatur lingkungan (Kalvin)
- $A_1$  : Konstantan ideal dioda 1
- $A_2$  : Konstantan ideal dioda 2
- $N_s$  :Jumlah seri pv *cells*
- $\Delta T$  :Perbedaan temperatur STC pada modul
- $K_i$  : $I_{sc}$  konstanta sesuai *datasheet*
- $K_v$  :Tegangan temperatur konstanta sesuai *datasheet*
- $I_{sc}$  : Arus *short circuit*
- G : *Irradiant Photovoltaic*
- $G_{STC}$  : *Irradiant* dalam kondisi standart (1000 Watt/m<sup>2</sup>)

### 2.3.3 Fotovoltaik Modul

Modul Fotovoltaik merupakan gabungan dari beberapa *Photovoltaic cell* yang di rangkai secara parallel untuk menambah nilai arus maupun seri untuk menambah nilai tegangan. Modul Fotovoltaik dikemas dengan kaca tempered dipermukaan depannya dan bahan pelindung agar tahan air. Dibagian tepi ditopang dengan frame aluminium untuk menahan *Photovoltaic cell* agar tidak bergeser dan menambah kekuatan dari modul Fotovoltaik. Di bagian bawah terdapat substrat atau metal backing yang berguna untuk menopang seluruh komponen dari *module cell* dan mempunyai konduktifitas listrik yang tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 yang terdiri dari 36 cell Fotovoltaik dan dibagi menjadi dua buah *bypass diode*. *Bypass diode* digunakan untuk rangkaian pengaman pada Fotovoltaic modul.

Penambahan *Photovoltaic cells* dengan dipasang secara seri maka menambah nilai tegangan pada panel surya. Penambahan nilai tegangan pada modul Fotovoltaic menjadikan mampu menyuplai daya yang besar ke sistem.



**Gambar 2.9** Modul *Photovoltaic* dengan 4x9 cell dengan *bypass diode*

Dibagian belakang modul terdapat box kotak tempat penyimpanan komponen elektrik yaitu tempat diode *bypass* dipasang. *Diode bypass Photovoltaic* sesuai dengan gambar 2.9 berguna pada saat terdapat bagian *Photovoltaic cell* yang rusak maupun saat modul *Photovoltaic* mengalami *partially shading*. Modul *Photovoltaic* dinilai sesuai dengan daya output maksimum dibawah *standart test condition* (STC). *Standart test condition* ditentukan oleh suhu modul cell yang beroperasi dari 25°C (77°F), dan tingkat irradiasi solar 1000W/m<sup>2</sup> dibawah masa udara 1,5 *spectral distribution*. Karena kondisi lingkungan tidak selalu typical sesuai dengan stc, di actualnya kinerja dari *Photovoltaic* modul berkisar antara 85% sampai 90% dari rating STC.

#### 2.3.4 *Photovoltaic array*

*Photovoltaic array* adalah interkoneksi modul Fotovoltaik yang berfungsi untuk membangkitkan energi listrik yang terdiri dari beberapa

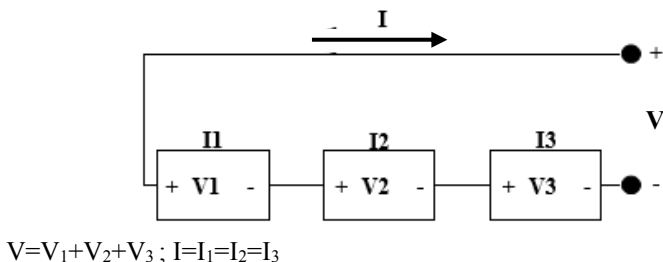
unit modul dan panel. Dengan jumlah module Fotovoltaik yang disusun dalam jumlah yang besar ,maka pv array memiliki Daya *output* yang lebih besar sehigga dapat men supply energi listrik dalam suatu wilayah tertentu.

Berdasarkan pola konfigurasi *Photovoltaic array* dapat dibedakan menjadi beberapa macam yang disesuaikan dengan kapasitas beban yang disupply. Masing-masing konfigurasi array memiliki kelebihan dan kekurangan diantaranya adalah:

#### 2.3.4.1 Konfigurasi modul seri

Modul Fotovoltaik dipasang secara seri maka aliran arus melewati setiap unsur panel dalam array. Jika konfigurasi modul diasumsikan sebagai pompa air untuk memutarakan turbin. Turbin merupakan beban yang harus diputar dengan air, jika memakai sebuah pompa mampu memompa air dua galon/menit setinggi 4-7 meter. Namun jika hendak memompa air dua galon/menit setinggi 15 meter tentunya akan menyambung pompa air secara seri satu sama lain , agar masukan setiap pompa keluar dari pompa lain. Aliran harus sama masing-masing pompa , dan setiap pompa memompa air ke atas . Oleh karena itu, total ketinggian air akan semakin bertambah dan berbanding lurus dengan tingkat tekanan air yang mengalir untuk memutar turbin.

Dalam hal ini listrik juga demikian, modul Fotovoltaik yang dipasang secara seri arus yang melewati modul –modul tetap sama, tetapi elektron akan bertambah tegangan setiap melewati modul.



**Gambar 2.10** Konfigurasi modul Fotovoltaik secara seri

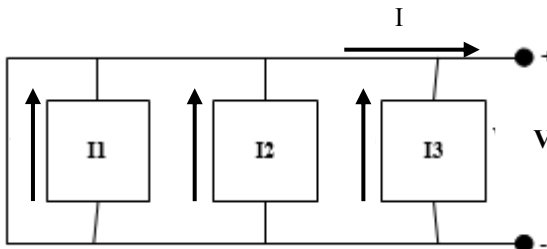
Pada Gambar 2.10 ditunjukkan bahwa susunan modul secara seri akan menambah tegangan keluaran Fotovoltaik. Pada Gambar 2.10

Tegangan total (V) merupakan penjumlahan dari ketiga modul Fotovoltaik ( $V+V_1+V_2+V_3$ ), namun arus yang dikeluarkan (I) ( $I = I_1=I_2=I_3$ ). tetap sesuai dengan nilai arus yang terdapat pada modul setiap modul.

#### 2.3.4.2 Konfigurasi modul parallel

Pada konfigurasi modul Fotovoltaik yang dipasang secara parallel, memiliki sejumlah electron-elektron yang disambung oleh modul peratama dan modul yang terakhir berada pada tegangan yang sama. Namun arus akan semakin bertambah sesuai dengan jumlah modul yang dipasang. Jika modul diibaratkan sebagai pompa air dan beban diibaratkan sebagai turbin yang berapa pada ketinggian yang sama, maka masing –masing pompa akan mampu mengalirkan air dengan arus yang semakin bertambah sehingga turbin dapat berputar dengan daya yang lebih besar pula. Namun karena ketinggian pompa tetap sehingga menyumbang tekanan yang sama pada turbin.

Begitu pula pada modul Fotovoltaik jika dipasang secara parallel memiliki arus yang semakin bertambah ( $I = I_1+ I_2+ I_3$ ). Namun tegangan yang dihasilkan tetap ( $V=V_1=V_2=V_3$ ). Sehingga dapat disimpulkan untuk menambah nilai tegangan maka Fotovoltaic modul harus dipasang secara parallel seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut.



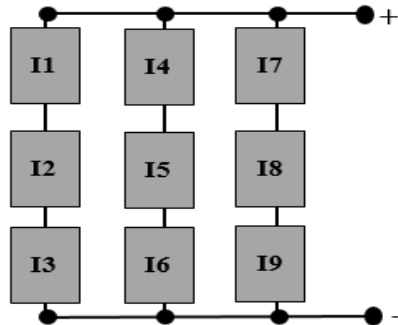
$$V=V_1=V_2=V_3 ; I = I_1+ I_2+ I_3$$

**Gambar 2.11** Konfigurasi Fotovoltaik yang dipasang secara parallel

#### 2.3.4.3 Konfigurasi modul seri-parallel (SP)

Konfigurasi modul secara seri-parallel memiliki dua kemungkinan kombinasi yaitu modul yang dipasang parallel didalam seri maupun seri yang dipasang didalam parallel. Dua kemungkinan kombinasi memiliki

keluaran arus dan tegangan yang sama. Jadi tidak ada perbedaan jika ingin memasang modul secara seri dan diikuti parallel maupun memasang modul parallel diikuti konfigurasi seri keduanya memiliki keluaran arus dan tegangan yang sama. Sesuai yang ditunjukkan pada gambar 2.12



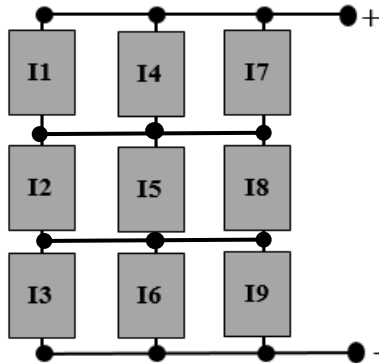
**Gambar 2.12** Konfigurasi array *Photovoltaic* modul secara seri-parallel

Konfigurasi modul array *Photovoltaic* secara seri-parallel paling banyak diimplementasikan pada kondisi *real*. Karena pemasangannya yang tidak terlalu sulit dan memudahkan teknisi untuk melakukan maintenance. Konfigurasi seri parallel ini juga mengalami kekurangan. Apabila dalam suatu sistem array terdapat modul Fotovoltaik yang tidak dilengkapi dengan *bypass diode* mengalami PSC atau kerusakan cell Fotovoltaik. Maka arus tidak bisa mengalir ke panel Fotovoltaik berikutnya, sehingga panel akan panas sehingga merusak cell Fotovoltaik tersebut.

#### **2.3.4.4 Konfigurasi modul *Total Cross Tied* (TCT)**

Konfigurasi tct atau total lintas terikat merupakan konfigurasi array Fotovoltaik yang memadukan antara seri parallel disetiap jalur. Sehingga jika dilihat pada Gambar 2.13, konfigurasi tct memiliki konfigurasi berbentuk kolom cell dan setiap baris dalam cell terdapat sebuah modul Fotovoltaik. Konfigurasi tct memiliki kelebihan jika pada saat *partially shading* memiliki daya maupun arus yang lebih efisien dan dissipasi daya yang lebih sedikit dari pada konfigurasi yang lain, namun

dalam membuat konfigurasi ini membutuhkan *wiring* kabel lebih rumit dan kompleks [12].



**Gambar 2.13** Konfigurasi array Photovoltaic modul total cross tied

## 2.4 Kurva Karakteristik Fotovoltaik

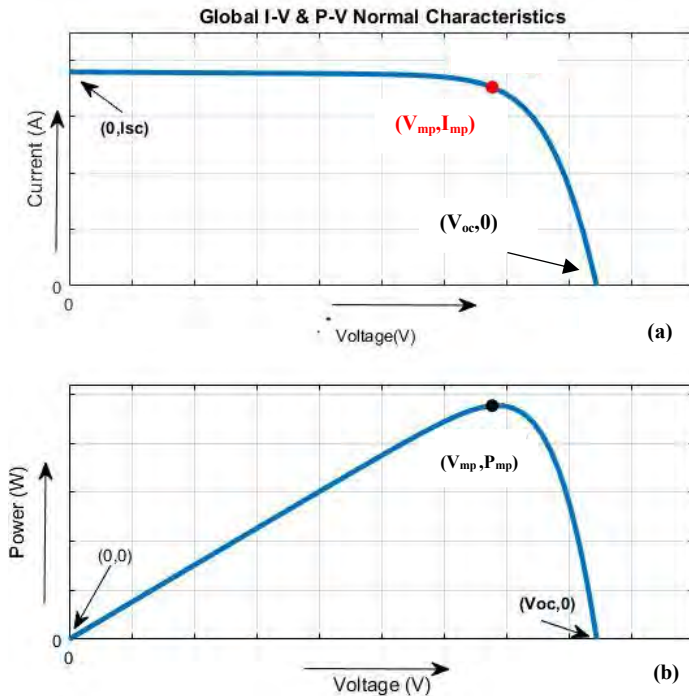
Kurva kekarakteristik Fotovoltaik merupakan kurva yang menggambarkan keluaran *output* dari Fotovoltaik. Berdasarkan parameternya kurva karakteristik Fotovoltaik ada dua macam yaitu kurva yaitu yang menghubungkan Arus dan Tegangan (I-V) keluaran photovolitic. Dan kurva yang merepresentasikan hubungan daya dan tegangan (P-V) keluaran Fotovoltaik. Berdasarkan keadaan dari *Photovoltaic* kurva karakteristik dibedakan menjadikan berikut :

### 2.4.1 Kurva Karakteristik Fotovoltaik dalam Keadaan normal

Fotovoltaik dalam keadaan normal merupakan keadaan *Photovoltaic module* saat menerima penyinaran di seluruh bagian modul dengan irradian 1000 Watt/m<sup>2</sup>. Kurva arus (I) terhadap tegangan (V) dan kurva daya (P) terhadap tegangan (V) pada radiasi dan suhu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.14. Pada gambar tersebut terdapat nilai *Maximum Power Point* (MPP). MPP merupakan daya maksimum hasil perkalian nilai arus maksimum ( $I_m$ ) dan nilai tegangan maksimum ( $V_m$ ). Nilai MPP akan semakin meningkat saat nilai irradian semakin meningkat dan berkebalikan dengan nilai suhu. Pada keadaan normal puncak daya pada kurva hanya memiliki satu puncak. Pada Gambar 2.14



Puncak daya ( $P_{mp}$ ) atau MPP ditunjukkan pada dengan titik merah untuk kurva I-V sedangkan pada kurva P-V ditunjukkan dengan titik hitam.



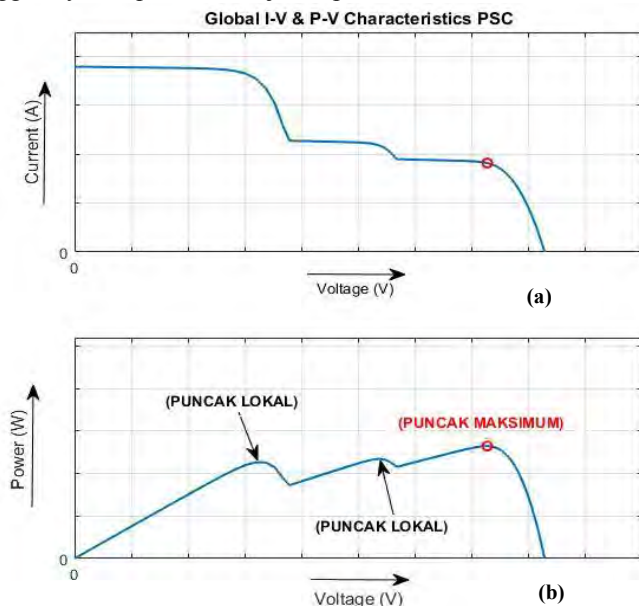
**Gambar 2.14** Kurva I-V dan P-V (kurva karakteristik) saat keadaan normal

Pada Gambar 2.14 masing-masing kurva P-V dan I-V memiliki titik MPP pada Gambar 2.14 (a) terdapat titik *short circuit current* ( $I_{sc}$ ) *Photovoltaic* hal ini terjadi saat nilai tegangan nol sehingga arus maksimum terdapat pada PV. Sedangkan Tegangan *open shircuit* ( $V_{oc}$ ) terjadi saat arus bernilai nol. Arus dan Power tergantung pada Array Fotovoltaik sedangkan maksimum Power ( $P_{mp}$ ) tergantung kepada temperatur dan level radiasi.  $I_{sc}$  menurun berdasarkan menurunnya nilai irradiant dan maksimum power ( $P_{mp}$ ) menurun saat nilai temperatur naik [9]. Tidak selalu nilai kerja pada Fotovoltaik selalu pada titik  $V_m$  dan  $I_m$ . Untuk menjamin Fotovoltaik bekerja pada titik  $V_m$  dan  $I_m$  sehingga *output* daya yang dikeluarkan adalah daya maksimum  $P_{max}$  diperlukan metode

pengendali. Metode pengendali tersebut dinamakan *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*.

#### 2.4.2 Kurva Karakteristik Fotovoltaik dalam Keadaan *Partially Shading Condition* (PSC)

Kurva Karakteristik Fotovoltaik pada PSC terjadi saat sebagian *Photovoltaic cell* pada modul mengalami penutupan cahaya. Sehingga sebagian *Photovoltaic cell* modul tidak dapat menghasilkan energi listrik. *Photovoltaic* modul menghasilkan kurva karakteristik I-V memiliki beberapa puncak dan satu puncak tertinggi ditunjukkan pada Gambar 2.15. Puncak P-V tertinggi disebut sebagai puncak daya maksimum (MPP). Sedangkan puncak-puncak yang lain disebut puncak daya lokal. Pada PSC teknik MPPT digunakan untuk menemukan solusi global sehingga daya *output* tidak terjebak pada solusi lokal Fotovoltaik.

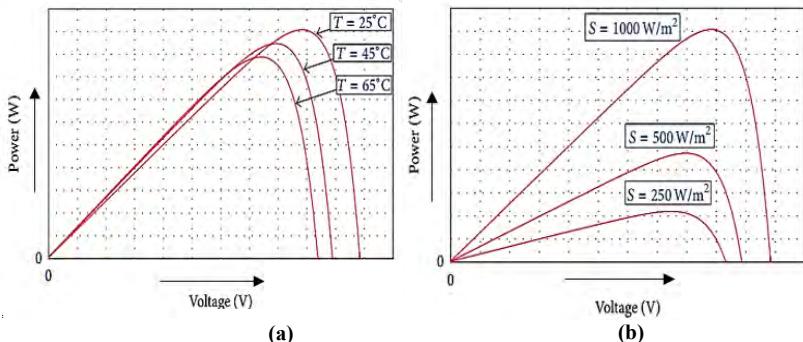


**Gambar 2.15** Kurva karakteristik (a) kurva I-V, (b) kurva P-V pada PSC

Pada Gambar 2.15 ditunjukkan bahwa pada saat *partially shading condition* parameter yang berubah adalah nilai dari puncak maksimum

( $P_{\max}$ ), nilai  $I_{sc}$ , dan  $V_{oc}$  pada suatu Fotovoltaik tidak mengalami perubahan. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa keadaan PSC suatu Fotovoltaik tidak mengubah nilai  $I_{sc}$  dan  $V_{oc}$  dari suatu modul Fotovoltaik. Sedangkan nilai variabel yang mengalami perubahan adalah daya maksimum ( $P_{\max}$ ).  $P_{\max}$  merupakan hasil perkalian antara arus maksimum ( $I_{mp}$ ) dan Tegangan maksimum ( $V_{mp}$ ).

Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai MPP adalah suhu lingkungan ( $T$ ) dan Irradiant ( $G$ ). Semakin Tinggi nilai suhu yang mengenai panel maka nilai MPP semakin kecil sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 apabila diberi sinar berlebih maka jumlah irradian cahaya yang diterima semakin banyak maka grafik akan semakin bergeser ke atas. Sehingga arus dan tegangan yang dihasilkan oleh Fotovoltaik semakin besar. Karena nilai radiasi pada Fotovoltaik berbanding lurus dengan daya *output* yang dihasilkan. Pengaruh suhu berbanding terbalik dengan daya *output* yang dihasilkan. Jika suhu semakin naik maka daya yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.16.



**Gambar 2.16** Kurva karakteristik (a) kurva I-V, (b) kurva P-V pada nilai radiasi dan suhu tertentu [5]

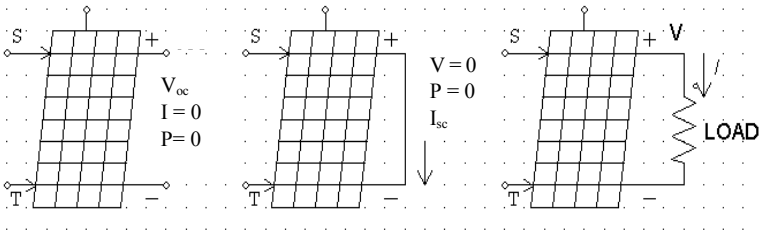
Gambar 2.16 (a) menunjukkan daya *output Photovoltaic* semakin besar ketika radiasi yang diterima semakin besar. Saat radiasi bernilai  $1000 \text{ W/m}^2$  pv memiliki nilai daya *output* yang lebih besar dari pada kurva yang menerima radiasi  $500 \text{ W/m}^2$ . Begitu pula pada Gambar 2.14 (b) menunjukkan ketika kurva memiliki suhu lingkungan  $T = 25^\circ\text{C}$

menghasilkan nilai daya *output* yang lebih besar dari kurva pada suhu lingkungan  $T=45^{\circ}\text{C}$ .

## 2.5 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum power point tracking (MPPT) merupakan suatu metode pada Fotovoltaik system untuk menghasilkan nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum sehingga dihasilkan daya *output* maksimum. MPPT berupa metode pelacakan (*tracking*) secara elektronik dengan algoritma tertentu untuk mencari nilai tegangan dan nilai arus pada daerah operasi maksimum. MPPT digunakan untuk mencari nilai *Maximum power point tracking* (MPP) yang dapat berubah berdasarkan irradiant, temperatur lingkungan dan umur dari solar cells[2].

Nilai daya yang MPPT dihasilkan oleh modul *Photovoltaic* menghasilkan Open Circuit Voltage ( $V_{oc}$ ). Jika terminal output disambungkan, maka *Photovoltaic* menghasilkan *Short Circuit Current* ( $I_{sc}$ ). Pada kedua kondisi tidak ada beban yang terpasang seperti pada Gambar 2.17



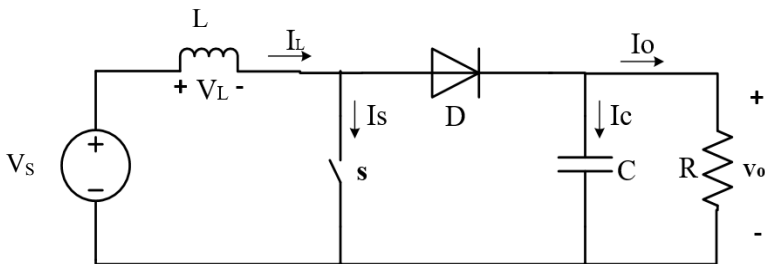
**Gambar 2.17** Open Circuit Voltage dan Short Circuit Current

Pengujian *Open Circuit Voltage* ( $V_{oc}$ ) dan *Short Circuit Current* ( $I_{sc}$ ) dapat dinyatakan dalam kurva karakteristik Fotovolitaik yaitu kurva arus terhadap tegangan (I-V) dan Daya terhadap tegangan (P-V). Sedangkan Persamaan untuk mencari nilai efisiensi tracking dari sistem ditunjukkan pada persamaan 2.21

$$\eta_{\text{tracking}} = \frac{P_{\text{tracking}}}{P_{\text{karakteristik Fotovoltaik}}} \times 100\% \quad \dots (2.21)$$

## 2.6 Boost Converter

DC-DC Converter memiliki beberapa jenis antara lain: *Boost Converter* (menurunkan tegangan), *Boost Converter* (menaikkan tegangan), *Buck-Boost Converter* (menaikkan dan menurunkan tegangan), dan *Inverting Topology/Flyback* (membalikkan polaritas tegangan *output*). *Boost Converter* terdiri dari: *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET), dioda, dan kapasitor. Besar tegangan *output* dari *Boost Converter* tergantung dari *Dutycycle*. Tegangan *output* besar daripada tegangan *input*. Sistem kerja *Boost Converter* berdasarkan pada *switching* MOSFET. Gambar rangkaian *Boost Converter* ditunjukkan pada Gambar 2.18 [15]



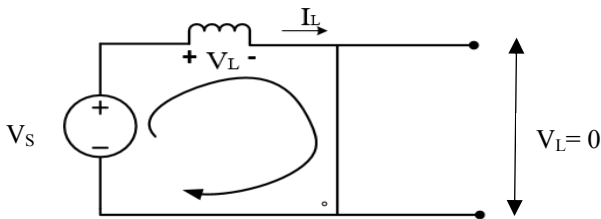
**Gambar 2.18** Rangkaian *Boost Converter*

Prinsip kerja *Boost Converter* memiliki dua mode kerja yaitu [3]:

1. Metode *switching* transistor dalam kondisi ON ( Mode pengisian arus induktor)
2. Metode *switching* transistor dalam kondisi OFF (Mode pengosongan arus induktor).

Pada saat skalar terhubung (ON), inductor akan terisi arus ( $i$ ), sementara tegangan  $V_L = 0$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19

L



**Gambar 2.19** *Boost Converter* kondisi saklar terhubung

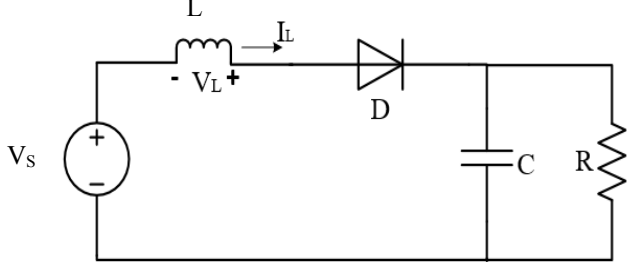
Berdasarkan rangkaian pada Gambar 2.19 didapatkan persamaan:

$$V_s = L \frac{dI}{dt} \dots\dots\dots (2. 22)$$

Saklar terhubung pada saat  $t_{on}$  perubahan arus yang melewati induktor diasumsikan konstan. Maka pada saat *switching on* menyala ( $t_{on}$ ) berlaku persamaa sebagai berikut :

$$V_s = L \frac{\Delta I}{dt} \dots\dots\dots (2. 23)$$

$$L \Delta I = V_s t_{on} \dots\dots\dots (2. 24)$$



**Gambar 2.20** *Boost Converter* kondisi saklar tidak terhubung

Pada Gambar 2.20 adalah kondisi saat saklar terbuka (OFF) , induktor yang semula dalam keadaan pengisian arus (*charging* ) menjadi pengosongan arus. Induktor menjadi sumber arus. Sehingga beban disuplai oleh dua sumber yaitu  $V_s$  dan  $V_L$ . Keadaan ini menyebabkan tegangan *output* lebih selalu lebih besar daripada tegangan *input*.

Pada saat saklar terbuka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_s + V_L = V_o \dots\dots\dots (2. 25)$$

$$V_s + L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_o \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

Persamaan (2.25) disubstitusikan ke persamaan (2.26) sehingga didapatkan,

$$V_s = L \frac{t_{on}}{t_{off}} + V_o \quad \dots\dots\dots (2.27)$$

$$V_o = V_s + \left(1 - \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \quad \dots\dots\dots (2.28)$$

*Duty Cycle (D)* adalah rasio antara interval waktu saklat terhubung dengan periode dari sistem.

$$D = \frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} = \frac{t_{on}}{T} \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

$$t_{on} = D \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

$$t_{off} = (1 - D)T \quad \dots\dots\dots (2.31)$$

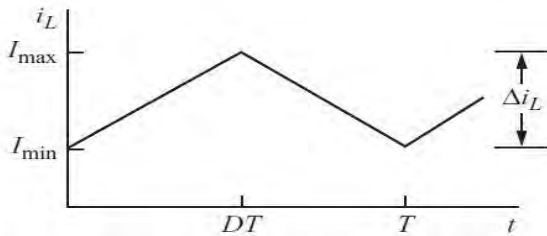
Persamaan (2.31) disubstitusikan ke persamaan (2.28) sehingga didapatkan,

$$V_o = V_s \frac{1}{(1-D)} \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

Pada persamaan 2.32 merupakan output tegangan dari *Boost Converter*. Dalam persamaan tersebut, *duty cycle* saat berpengaruh pada nilai *output*. Nilai *duty cycle* berbanding terbalik dengan nilai tegangan *output*. Sedangkan riak tegangan dipengaruhi oleh nilai induktansi inductor ditunjukkan pada persamaan (2.33) dibawah ini [2].

$$V_s = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

*Ripple* arus ( $\Delta I$ ) didapat dengan menentukan nilai induktansi ( $L$ ) berbanding terbalik dengan nilai *ripple* arus ( $\Delta I$ ). Pada Gambar 2.21 menunjukkan rimple arus inductor yang memiliki nilai  $I_{max}$  dan  $I_{min}$ . Pada saat nilai  $I_L$  naik keadaan saklar dalam keadaan tertutup sedangkan saat nilai  $I_L$  menurun menunjukkan saklar dalam keadaan terbuka.

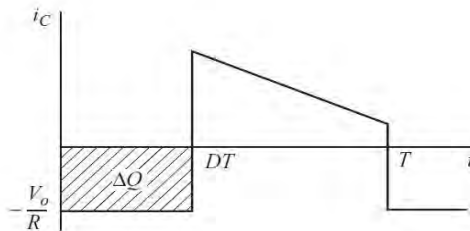


**Gambar 2.21** Sinyal Arus pada Induktor

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \dots\dots\dots (2.35)$$

Nilai *ripple* tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya adalah pemilihan nilai kapasitansi pada kapasitor pada. Gambar 2.22 merupakan bentuk sinyal dari arus pada kapasitor ( $i_c$ ). Sumbu X merepresentasikan nilai waktu atau periode sistem. Sedangkan sumbu Y merepresenasikan nilai arus pada kapasitor ( $i_c$ ).



**Gambar 2.22** Sinyal arus pada kapasitor terhadap waktu

Nilai muatan listrik yang disalurkan ke sistem saat saklar terbuka dirumuskan pada persamaan 2.36

$$\Delta Q = \frac{V_o}{R} \times DT \dots\dots\dots (2.36)$$

Dengan rumus dari capasitor :

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \dots\dots\dots (2.37)$$

Mensubtitusikan persamaan 2.36 dan 2.37 maka didapat nilai Capasitor :

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} \dots\dots\dots (2.38)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o DT}{RC} \dots\dots\dots (2.39)$$

$$\Delta V_o = \frac{V_o D}{RCf} \dots\dots\dots (2.40)$$

$$C = \frac{D}{R(\frac{\Delta V_o}{V_o})f} \dots\dots\dots (2.41)$$

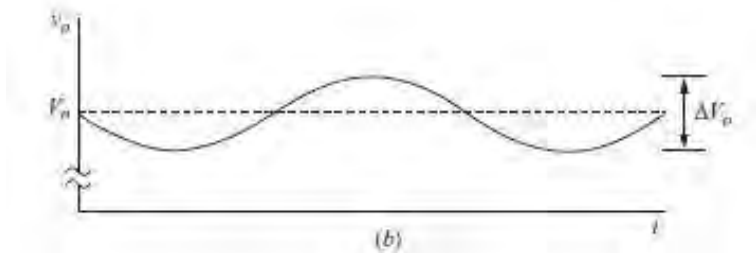
Sedangkan nilai dari *ripple* teagangan minimal dan *ripple* tegangan maksimal ditunjukkan pada persamaan 2.42 dan 2.43



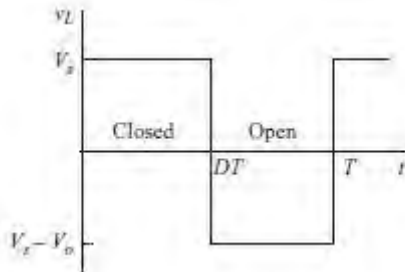
$$V_{max} = V_o + \frac{\Delta V_o}{2} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$V_{min} = V_o - \frac{\Delta V_o}{2} \dots\dots\dots (2.43)$$

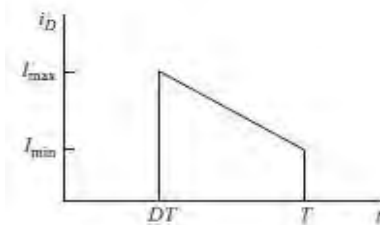
Pada persamaan 2.42 dan 2.43 didapatkan dari perhitungan tegangan *output* ( $V_o$ ) dengan menambahkan nilai selisih nilai *ripple* tegangan minimal dan maksimal dibagi dua sehingga didapatkan nilai tegangan maksimal ( $V_{max}$ ) dan tegangan minimal ( $V_{min}$ ).



**Gambar 2. 23** Sinyal *ripple* kapasitor terhadap waktu



**Gambar 2.24** Sinyal Tegangan Induktor terhadap waktu



**Gambar 2.25** Sinyal arus paa dioda terhadap waktu

Pada Gambar 2.25 sinyal arus pada dioda terdapat dua nilai arus yang dapat dilihat yaitu arus maksimal ( $I_{\max}$ ) dan arus minimal ( $I_{\min}$ ).

## 2.7 Particle Swarm Optimization

*Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan teknik optimasi berbasis populasi yang diperkenalkan oleh James Kennedy dan Russ Eberthart pada tahun 1995[13]. Teknik ini terinspirasi dari tingkah laku social pada kawanan burung yang terbang berduyun-duyun (*bird flocking*) atau gerombolan ikan yang berenang berkelompok (*fish schooling*). Kawanan burung yang banyak dapat membentuk formasi tertentu tanpa mengalami tabrakan satu sama lain. Gerombolan ikan yang sangat banyak berjumlah ribuan bisa bergerak sangat cepat tanpa tabrakan meskipun jarak antar ikan sangat berdekatan. Burung maupun ikan memiliki kecerdasan yang luar biasa yaitu mampu menjaga jarak tetap stabil saat terbang maupun saat berenang. Kecerdasan inilah yang diadopsi oleh kedua ilmuwan tersebut. Kedua ilmuwan tersebut menamakan *particle swarm optimization* (optimasi kawanan partikel). Mereka menyebutnya particle karena pada dasarnya banyak makhluk hidup yang memiliki kecerdasan seperti burung dan ikan misalnya belalang dan lebah[14].

PSO merupakan suatu metode optimisasi yang *flexible*, handal dengan populasi yang berbasis stokastik. Stokastik merupakan klasifikasi algoritma optimisasi yang bekerja dengan adanya unsur keacakan. Algoritma ini mencapai titik yang berbeda setiap kali algoritma dieksekusi, walaupun titik tebakan awal yang digunakan selalu sama.

Pada konteks optimisasi banyak variabel, populasi diasumsikan memiliki ukuran tertentu dengan setiap partikel posisi awalnya terletak di suatu lokasi yang acak dalam multidimensi. Setiap partikel diasumsikan memiliki dua karakteristik yaitu posisi dan kecepatan. Setiap partikel bergerak dalam ruang tertentu dan posisi terbaik pernah ditemukan sumber makanan atau nilai objektif. Setiap partikel menyimpan informasi terhadap partikel lain dan menyesuaikan posisi dan kecepatan masing-masing berdasarkan informasi yang diterima. Meskipun setiap burung memiliki keterbatasan dalam hal kecerdasan, namun kawanan burung akan mengikuti kebiasaan (*rule*) seperti berikut: [14]

1. Seekor burung tidak terlalu dekat dengan burung lain
2. Burung akan mengarahkan terbangnya ke arah rata-rata keseluruhan burung.
3. Akan memposisikan diri rata-rata posisi burung yang lain dengan menjaga kawanan burung agar tidak terlalu jauh.

Perilaku burung akan didasarkan pada kombinasi dari tiga factor yaitu:

1. Kohesi yaitu terbang bersama.
2. Separasi yaitu jangan terlalu dekat.
3. Penyesuaian (*alignment*) yaitu mengikuti arah beresama.

Model ini diasumsikan pada ruang dan dimensi tertentu dengan sejumlah literasi sehingga disetiap literasi posisi partikel akan semakin mengarah ke target yang dituju yaitu fungsi minimal atau maksimal hingga tercapai iterasi maksimal.

*Learning* proses partikel berdasarkan dua aturan yaitu menambah nilai dari posisi terbaik global (*Global best position*) yang ditemukan oleh particle lain (*social influence*) dan mengurangi nilai lokal terbaik (*cognition influence*). Posisi setiap partikel akan dievaluasi oleh fungsi fitness (*fitness function*). Di algoritma ini, fungsi *fitness* menggunakan kecepatan (*V*) dan posisi (*X*), menghitung nilai fitness dari setiap partikel. Posisi global dan lokal terbaik (*Global and local best positions*) Kecepatan partikel dan posisi partikel adalah dua istilah pada algoritma PSO pada saat terjadi proses pencarian makanan. Selama proses pencarian (*iterative process*), yang kecepatan dan posisi setiap partikel diperbarui berdasarkan pada inersia, komponen sosial dan komponen kognitifnya. Secara matematis rumus PSO ditunjukkan pada persamaan 2.44 dan 2.45.[15]

$$V_{i+1} = V_i + C_1 r_1 (LB_i - x_i) + C_2 r_2 (GB - x_i) \dots\dots\dots (2.44)$$

$$X_{i+1} = X_i + tv_{i+1} \dots\dots\dots (2.45)$$

Keterangan :

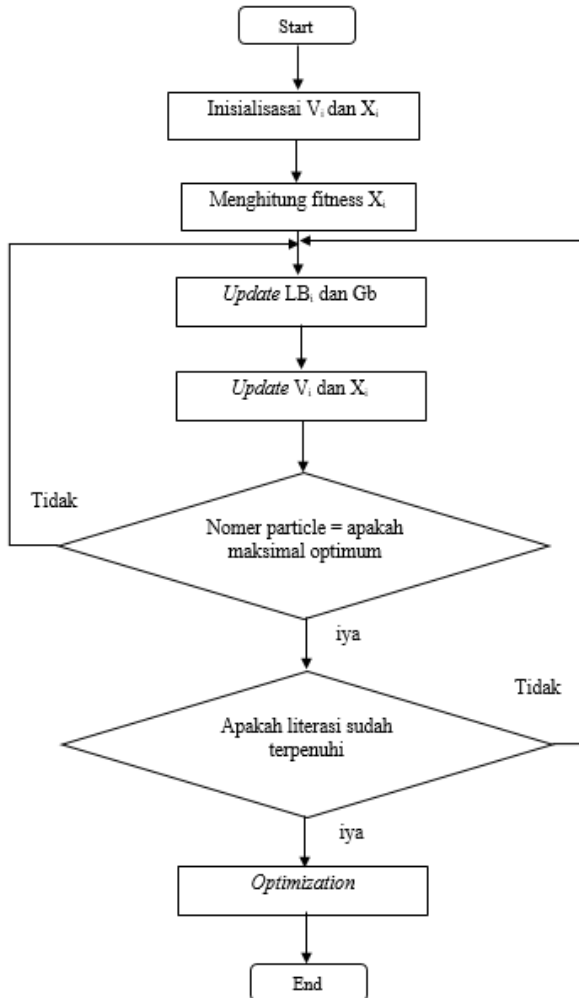
- $V_i$  = Kecepatan particle I,  
 $C_1$  = Cognitive learning factor  
 $C_2$  = Social learning factor  
 $r_1$  dan  $r_2$  = Random numbers distributed memiliki nilai 0 sampai 1.  
 $LB_i$  = Local best position particle i.

$GB$  = *Global best position particle* .

$x_i$  = Posisi particle ke-  $i$ .

$x_{i+1}$  = Posisi particle literasi selanjutnya.

Proses pencarian PSO akan berhenti ketika jumlah maksimum literasi terpenuhi. *Flowchart PSO algorithm* secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.26. Pada flowchart tersebut ditunjukkan bahwa inisialisasi dilakukan pertama kali pada kecepatan *particle* awal ( $V_i$ ) dan posisi awal *particle*( $x_i$ ), setelah itu dilakukan *evaluasi* posisi fitness *particle*.



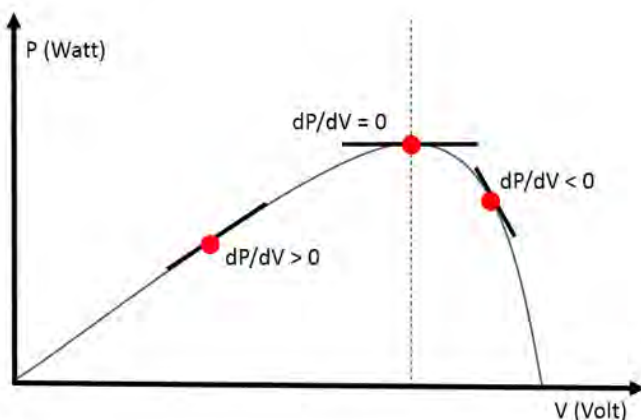
**Gambar 2.26** Flowchart PSO algorithm secara umum

Pada literasi (pengulangan ) pertama dan literasi belum terpenuhi maka akan dilakukan update *Local best position particle* ke-1 dan *Global best position particle*. Sehingga dilakukan pula update kecepatan dan

update posisi *particle* berdasarkan persamaa 2.24 dan 2.25. pengulangan ini akan terus berlangsung sampai jumlah literasi maksimum tercapai. Saat literasi maksimum tercapai maka titik optimasi pada *particle* akan tercapai dengan adanya *particle* dapat mengumpul menjadi satu titik (konvergen) yang disebut titik optimasi .

## 2.8 Teknik *Perturb and Observe* (P&O)

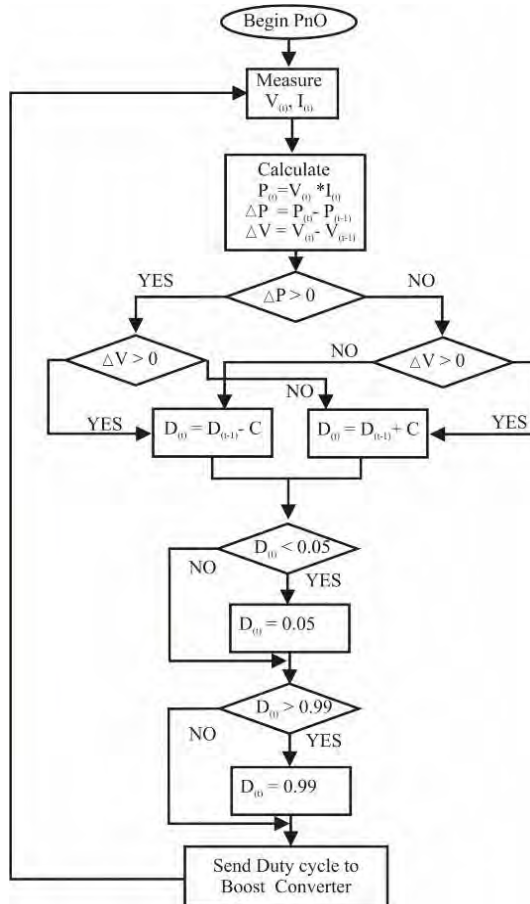
Teknik *Perturb and Observe* (P&O) bekerja berdasarkan prinsip kemiringan kurva (gradien) perubahan daya terhadap perubahan tegangan ( $dP/dV$ ) ditunjukkan pada Gambar 2.27. *Perturb and Observe* (P&O) membagi kurva karakteristik *Photovoltaic* menjadi tiga bagian yaitu pada titik puncak memiliki nilai perubahan daya dan perubahan tegangan ( $dP/dV = 0$ ) yang disebut sebagai nilai MPP . Pada nilai MPP terjadi saat tidak ada selisih antara perbandingan daya dan tegangan. Pada daerah sebelah kanan ( $dP/dV < 0$ ) nilai tegangan modul harus diturunkan berdasarkan selisih tegangan sebelumnya ( $\Delta V_{pv}$ ) untuk menuju titik MPP. Sedangkan pada daerah sebelah kiri ( $dP/dV > 0$ ), maka nilai tegangan harus dinaikkan berdasarkan selisih tegangan sebelumnya ( $\Delta V_{pv}$ ) untuk menuju titik MPP [6].



**Gambar 2.27** Gradien pada kurva P-V karakteristik panel surya.

Untuk mempermudah pembacaan proses teknik P&O ditunjukkan *flow chart* P&O pada Gambar 2.28. Proses pertama kali dilakukan dengan

melakukannya pengukuran (*sensing*) pada tegangan dan arus guna mendapatkan nilai Daya. Dengan membandingkan nilai daya sebelumnya ( $P(t-1)$ ) dan nilai daya pada saat itu ( $P(t)$ ) maka didapatkan selisih daya. Begitu pula dilakukan pada nilai tegangan.



**Gambar 2.28** Flowchart Teknik P&O

Sehingga nantinya perbandingan nilai daya tersebut masuk pada daerah sebelah kanan atau daerah sebelah kiri guna menentukan

pengurangan atau penambahan pada tegangan untuk proses update nilai daya dan nilai tegangan selanjutnya. Metode P&O memiliki kekurangan yaitu apabila terjadi perubahan kondisi atmosfer dengan tiba-tiba. Ketika atmosfer mengalami perubahan maka irradian yang mengenai Fotovoltaik juga mengalami perubahan. Hal ini juga berpengaruh pada perubahan daya yang secara tiba-tiba tidak bisa diikuti dengan sensing sensor tegangan terhadap perubahan tegangan yang tiba-tiba .[6]



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB III

## PEMODELAN SISTEM DAN ALGORITMA PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Bab ini berisi tentang metode untuk penyelesaian permasalahan *Photovoltaic array* dalam keadaan *partially shading* menggunakan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT yang berfungsi untuk mendapatkan *Daya output Fotovoltaik* dituning menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Dengan karakteristik dan kelebihan yang dimiliki PSO sehingga mampu mendapatkan hasil *Daya output* maksimal dari MPPT *Fotovoltaik* pada keadaan *partially shading*.

Pada bab tiga juga dijelaskan tentang algoritma *Particle swarm optimization*, parameter yang digunakan, dan langkah program PSO dalam pengaturan optimisasi MPPT *Fotovoltaik* pada *partially shading*. Metode PSO akan dibandingkan dengan metode *Perturb and Observed* (P&O).

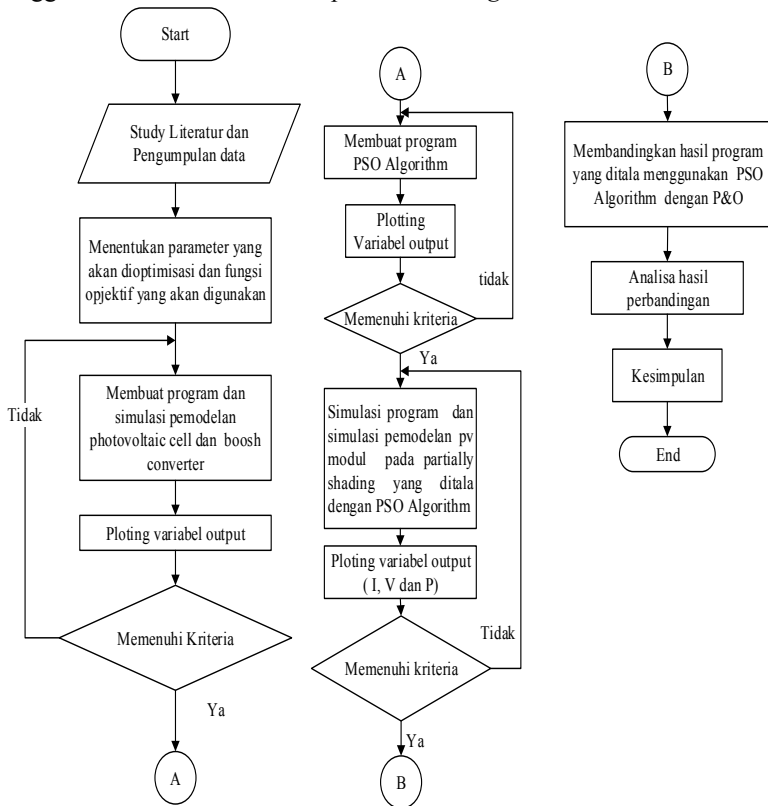
### 3.1 Metodologi Penelitian

*Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dengan metode *Particle Swarm Optimization* digunakan untuk mengoptimalkan *output Photovoltaic array* pada keadaan *partially shading*. *Sistem Fotovoltaik* tersusun dari beberapa modul yang memiliki karakteristik yang sama dengan paparan suhu (T) yang sama namun, mendapatkan berbagai kondisi intensitas cahaya atau irradian (G atau S) yang berbeda. Sehingga output masing-masing modul Fotovoltaik menghasilkan daya yang berbeda-beda. Pada tugas akhir ini untuk mendapatkan set point output MPPT yang diinginkan diperlukan langkah-langkah yang sistematis dan runtut dalam proses perencanaan dan penyelesaian masalah MPPT pada *partially shaded condition*.

Metodologi penelitian secara lengkap disajikan pada Gambar 3.1. Pada Gambar 3.1 dijelaskan bahwa penelitian ini dimulai dari studi literature baik dari buku, paper maupun dari hasil penelitian sebelumnya. Selanjutnya, pengumpulan data- data yang berkaitan dengan *Sistem Fotovoltaik*. Data-data yang diperoleh digunakan untuk mencari parameter Sistem Fotovoltaik baik dalam keadaan normal maupun dalam keadaan *partially shaded*. Langkah yang dilakukan selanjutnya adalah

membuat pemodelan *Photovoltaic cell*. Pemodelan yang digunakan adalah pemodelan dengan *ideal double diode model*.

Pemodelkan Sistem Fotovoltaik dengan dua macam pemodelan yaitu pemodelan MPPT dengan kondisi normal tanpa *partially shading* dan pemodelan MPPT dengan *partially shading*. Pemodelan dan simulasi *Sistem Fotovoltaik* menggunakan Simulink Matlab. Mendesain *Sistem Fotovoltaik*, boosh converer, beban system menggunakan resistor murni dengan gate MOSFET dikontrol menggunakan PWM (*Pulse With Modulation*). PWM dijalankan di Simulink Matlab dan ditala menggunakan *Particle Swarm Optimization algorithm*.



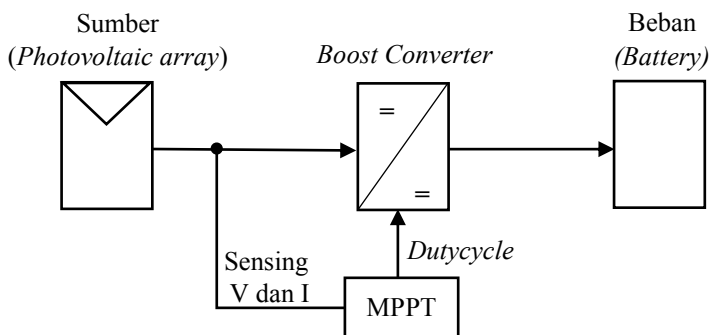
**Gambar 3.1** Alur Metodologi Penelitian

PSO *algorithm* berfungsi untuk menala PWM untuk membuka *gate* MOSFET supaya mendapatkan tegangan output yang optimal saat sistem dalam kondisi *partially shading*. Pada keadaan *partially shading* Sistem Fotovoltaik menerima intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah menyebabkan daya keluaran Sistem Fotovoltaik juga berubah-ubah. MOSFET bekerja berdasarkan penalaan dari PSO *algorithm* kemudian mengatur *dutycycle* pada MOSFET. PSO *algorithm* kemudian dibandingkan dengan *Partum and Obserb* (P&O). Simulasi ini bertujuan untuk memperoleh perbandingan antara daya keluaran *photovoltac system* saat *partially shading* dengan optimisasi PSO *algorithm* dan P&O pada intensitas cahaya matahari yang berbeda-beda

Setelah simulasi berakhir maka langkah terakhir adalah penarikan kesimpulan dari keseluruhan penelitian yang diperoleh hasil pengujian simulasi. Kesimpulan ditujukan untuk memadukan permasalahan dan tujuan penelitian berdasarkan data hasil simulasi *system Photovoltaic*.

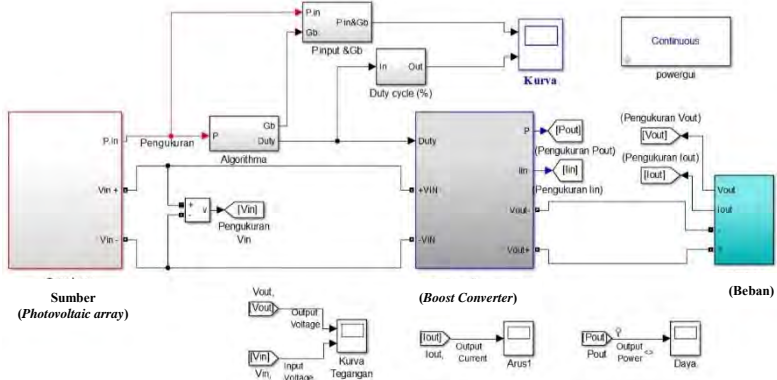
### 3.2 Pemodelan Sistem Secara Keseluruhan

Pada sub bab ini dijelaskan mengenai pemodelan sistem dari setiap bagian dari sistem MPPT mulai dari sumber daya sampai ke bagian beban sistem. Selain itu dibahas pula proses kinerja pada Algoritma MPPT yaitu PSO dan P&O sekaligus dengan aplikasi. Untuk optimisasi *Maximum Power Point Tracking* pada Sistem Fotovoltaik. Secara umum desain *Maximum Power Point Tracking* menggunakan PSO *algorithm* dan teknik P&O ditunjukkan pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Pemodelan Sistem secara keseluruhan

Pada Gambar 3.2 dilakukan implementasi berupa simulasi di Matlab Simulink yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 di bawah ini .



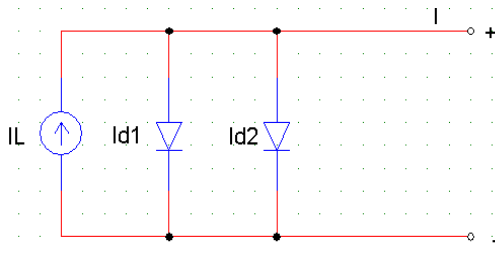
**Gambar 3. 3** Implementasi Simulasi Sistem secara keseluruhan

Pada Gambar 3.2 dan 3.3 diatas ditunjukkan mengenai proses kerja dari MPPT Sistem Fotovoltaik yang terdiri dari empat bagian penting yaitu sumber, boost converter, beban dan MPPT. *Boost converter* digunakan untuk menaikkan level tegangan sumber yang disesuaikan dengan beban. Pada blok Sumber berisi model *Photovoltaic array*. Nilai parameter yang akan diamati adalah daya sumber (Watt) yang dihasilkan oleh array panel surya. Daya keluaran dari *boost converter*, Arus output, Daya output dan duty cycle. Nilai daya sumber dari *Photovoltaic array* yang merupakan perkalian dari arus dan tegangan yang terukur digunakan sebagai variabel input MPPT untuk menghasilkan nilai *dutycycle*. *Dutycycle* digunakan untuk pengendali daya pada blok algoritma yang sebelumnya *dutycycle* diubah dulu menjadi sinyal PWM. Pada tugas akhir ini beban yang diberikan berupa resistor murni

### 3.2.1 Pemodelan Fotovoltaik

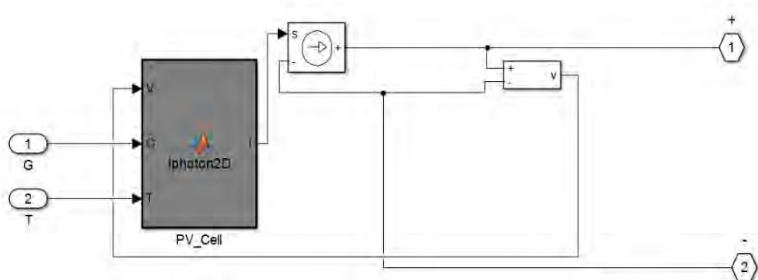
Modul Fotovoltaik panel diperlukan pemodelan simulasi sehingga memudahkan mengujian. Pada simulasi Sistem Fotovoltaik ini

pemodelan yang digunakan adalah *ideal double diode model*. Rangkaian pengganti *ideal double diode model* ditunjukkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3. 4** Rangkaian pengganti ideal double diode model

Pada Gambar 3.4 dilakukan implementasi berupa simulasi di Matlab Simulink yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



**Gambar 3. 5** Implementasi simulasi rangkaian pengganti ideal double diode model

Pada Gambar 3.5 merupakan implementasi rangkaian pengganti *ideal double diode model*. Blok PV\_cell berisikan rangkaian pada Gambar 3.4 yang diimplementasikan berupa persamaan pada bab sebelumnya yaitu persamaan 2.13 sampai dengan persamaan 2.17. Modul Fotovoltaik dengan *ideal double diode model* memiliki dua buah masukan yaitu suhu ( $T$ ) dan irradian ( $G$ ). Model tersebut menghasilkan nilai arus  $I=f(V)$  yang merupakan fungsi tegangan [2]. Nilai arus  $I=f(V)$  diperoleh dari model *photovoltaic double diode model ideal* tanpa *Resistance series* ( $R_s$ ) dan *Resistance shunt* ( $R_{sh}$ ). Walaupun *ideal double diode model* tanpa dilengkapi  $R_s$  dan  $R_{sh}$ , model ini memiliki keuntungan yaitu memiliki

waktu simulasi yang lebih cepat dengan total waktu reduksi 34,72% serta dengan akurasi yang tetap tinggi [2].

Untuk mendapatkan nilai parameter pada pemodelan Fotovoltaik *ideal double diode model* maka dilakukan perhitungan sebagai berikut:

Beberapa parameter yang sudah diketahui yaitu:

$$\begin{aligned}
 G &= 1000 \text{ W/m}^2 \\
 T &= 25 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 N_s &= 36 \text{ jumlah cell (seri)} \\
 I_{sc} &= 4.98 \text{ A} \\
 V_{oc} &= 21.8 \text{ V} \\
 I_{mp} &= 4.55 \text{ A} \\
 V_{mp} &= 17.6 \text{ V} \\
 K_v &= -3,2 \text{ mV/}^\circ\text{C} \\
 K_i &= 0,4 \text{ mA/}^\circ\text{C} \\
 P_{max} &= 80 \text{ W} \\
 TK &= (273 + T) \text{ K} \\
 T_{stc} &= 298 \text{ K} \\
 G_{stc} &= 1000 \text{ W/m}^2 \\
 q &= 1.602e^{-19} \text{ C (Coulomb)} \\
 K &= 1.381e^{-23} \text{ Nm/K} \\
 A_1 &= 1
 \end{aligned}$$

Mencari nilai parameter dilakukan pada Irradian ( $G$ ) = 1000  $\text{W/m}^2$  dan Suhu lingkungan  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$  dengan persamaan 2.23

$$I = I_{pv} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{N_s A_1 K T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{N_s A_2 K T}\right) - 1 \right]$$

Parameter  $I_{pv}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  adalah besaran yang bergantung dari nilai radiasi matahari dan suhu lingkungan. Nilai  $I_{pv}$  diperoleh melalui persamaan (2.14),  $I_{01}$  diperoleh melalui persamaan (2.15) sedangkan  $I_{02}$  diperoleh dari persamaan (2.16)

$$\begin{aligned}
 I_{PV} &= (I_{SC} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \\
 &= (4,98 + 0,4 \times 10^{-3} \times (298 - 298)) \frac{1000}{1000} \\
 &= 4,98 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Pada hasil perhitungan arus Fotovoltaik ( $I_{PV}$ ) pada Irradian 1000  $\text{W/m}^2$  dengan suhu  $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Memiliki nilai yang sama dengan nilai arus

*short circuit* hal ini dikarenakan perbandingan suhu lingkungan dengan suhu *standart tes condition* (STC) memiliki nilai yang sama.

$$\begin{aligned}
 I_{01} &= \frac{(I_{sc} - K_i \Delta T)}{\exp\left[\frac{(V_{oc} + K_i \Delta T) * q}{(N_s K T A)}\right] - 1} \\
 &= \frac{4,98 - 0,4 \times 10^{-3} \times (298 - 298)}{\exp\left[\frac{(21,8 + 0,4 \times 10^{-3} \times (298 - 298)) \times 1,6 \times 10^{-19}}{(36 \times 1,38 \times 10^{-3} \times 298 \times 1)}\right] - 1} \\
 &= \left(\frac{4,98}{29351 \times 10^9}\right) \\
 &= 1,6967 \times 10^{-9} \text{ A}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diatas nilai arus reverse saturasi dioda 1 memiliki nilai yang sangat kecil yaitu  $1,6967 \times 10^{-9}$  Ampere. Hal ini berbeda dengan nilai arus reverse saturasi dioda 2. Nilai  $I_{02}$  memiliki nilai tiga sampai empat kali lebih besar dari pada  $I_{01}$ .

$$\begin{aligned}
 I_{02} &= \left(\frac{(T)^{\frac{2}{5}}}{3,77}\right) I_{01} \\
 &= \left(\frac{(298)^{\frac{2}{5}}}{3,77}\right) 1,6967 \times 10^{-9} \\
 &= 3,3688 \times 10^{-7} \text{ A}
 \end{aligned}$$

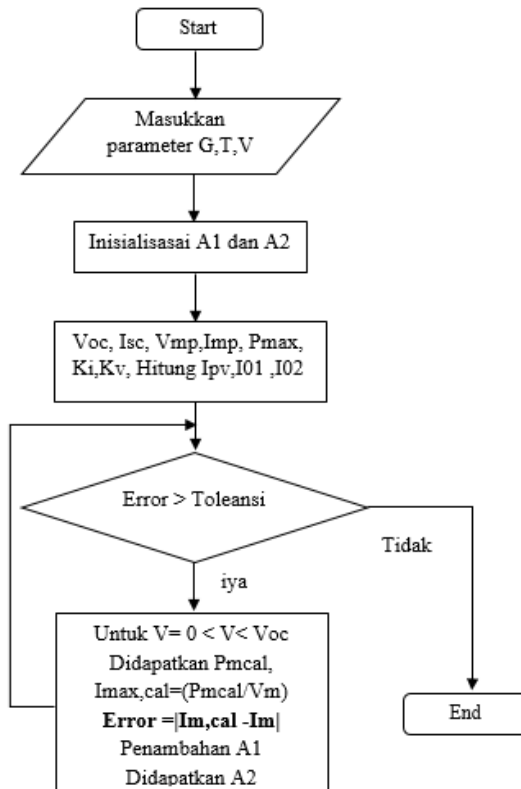
Berdasarkan perhitungan diatas nilai arus *reverse* saturasi dioda 2 adalah  $3,3688 \times 10^{-7}$  Ampere yaitu memiliki nilai tiga sampai empat kali lebih besar dari pada nilai arus *reverse* saturasi dioda 1.

Mencari nilai konstanta dioda ideal  $A_2$  diperoleh dari persamaan 2.17. Pengertian dari konstanta dioda ideal adalah nilai konstanta yang menjadikan dioda mendekati nilai idealnya. Persamaan 2.17 dilakukan pemrograman di Matlab mfile sesuai dengan *flowchart* pada Gambar 3.6 dengan beberapa nilai yang diketahui.

$$A_2 = \frac{(q V_{oc})}{N_s T K \ln \left[ \frac{I_{pv} - (I_{01} (\exp(q V / (N_s K A_1 T)) - 1))}{I_{02}} + 1 \right]}$$



Blok pada Gambar 3.6 merupakan hasil pemrograman pada Matlab M-file dan Simulink. Untuk membantu pemrograman pada Matlab maka dibuat diagram alur berfikir atau flowchart yang ditunjukkan pada Gambar 3.6

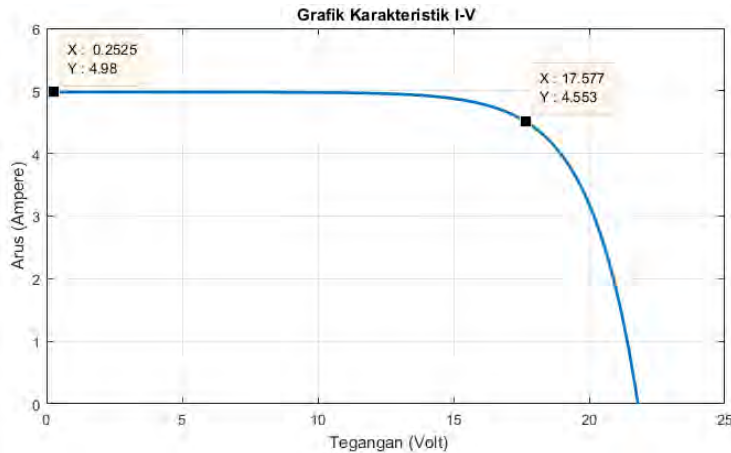


**Gambar 3. 6** Flowchart mencari parameter  $A_2$  double diode model

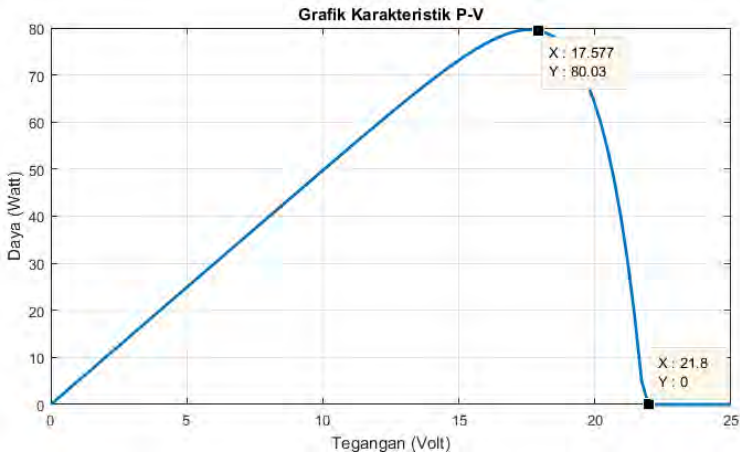
Flowchart pada Gambar 3.6 parameter  $P_{m,cal}$  merupakan daya maksimum yang didapatkan dari perhitungan. Sehingga didapatkan nilai dari ideally model  $A_2$  adalah 1,3. Kemudian dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan 2.13

$$\begin{aligned}
I &= I_{pv} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{N_s A_1 K T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{q(V)}{N_s A_2 K T}\right) - 1 \right] \\
&= 4,98 - 1.6967 \times 10^{-9} \left[ \exp\left(\frac{1.6 \times 10^{-19} (17.6)}{36 \times 1 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 298}\right) - 1 \right] - 3.3688 \times 10^{-7} \\
&\quad \left[ \exp\left(\frac{1.6 \times 10^{-19} (17.6)}{36 \times 1,3 \times 1,38 \times 10^{-23} \times 298}\right) - 1 \right] \\
&= 4,98 - (1.6967 \times 10^{-9} \times [117875876.7]) - \\
&\quad (3.3688 \times 10^{-7} \times [673830.44]) \\
&= 4,98 - 0,2 - 0,227 \\
&= 4,553 \text{ A}
\end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai Arus keluaran Cell Fotovoltaik pada saat  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  dengan suhu lingkungan  $25^\circ\text{C}$  didapatkan 4,553 Ampere. Setelah itu dilakukan percobaan simulasi dengan range tegangan  $V = (0 < V < V_{oc})$  untuk mengetahui nilai  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$  pada karakteristik Grafik I-V dan P-V sesuai pada Gambar 3.7 dibawah ini.



(a)



(b)

**Gambar 3. 7** Grafik karakteristik (a).Grafik karakteristik Fotovoltaik I-V.(b) Grafik karakteristik Fotovoltaik P-V

Pada Grafik karakteristik diatas didapatkan nilai  $P_{max} = 80.03$  Watt,  $V_{oc} = 21.8$  Volt,  $I_{sc} = 4,98$  A,  $I_{mp} = 4,553$  A, dan  $V_{mp} = 17,577$  Volt. Grafik karakteristik pada Gambar 3.7 diperoleh dari pengujian satu buah modul pv diberi beban berupa kapasitor *load*. Kapasitor tersebut disambungkan ke pv secara langsung dan sekaligus diberikan penyinaran matahari dengan irradiant sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$  Pada table 3.1 didapatkan nilai akurasi antara datasheet dan nilai pengujian pemodelan Fotovoltaik. Modul Fotovoltaik solar cell yang digunakan adalah merk GH SOLAR model GH80P-18 dengan kapasitas 80 Watt yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3. 1** Spesifikasi Modul PV GH80P-18 3

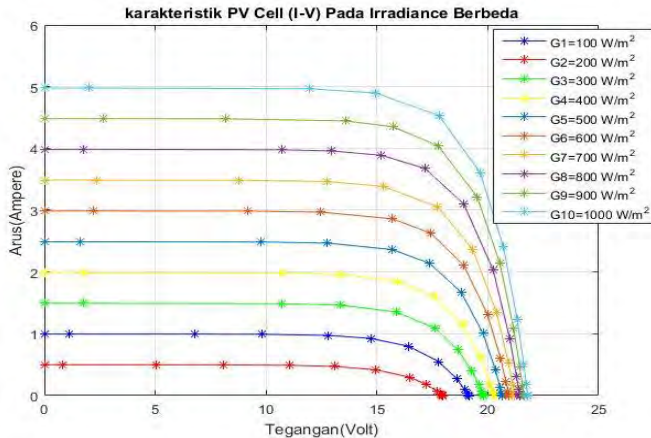
No.	Parameter	Nilai <i>datasheet</i> Modul PV	Nilai Pengujian modul PV	Akurasi Pengujian
1.	$I_{sc}$ (A)	4,98	4,980	100%
2.	$V_{oc}$ (V)	21,8	21,8	100 %
3.	$I_{mp}$ (A)	4,55	4,553	99.99%
4.	$V_{mp}$ (V)	17,6	17,577	99.87%
5.	$K_i$ (mA/°C)	0,4	0,4	100%

**Tabel 3. 1** Spesifikasi Modul PV GH80P-18 3 lanjutan

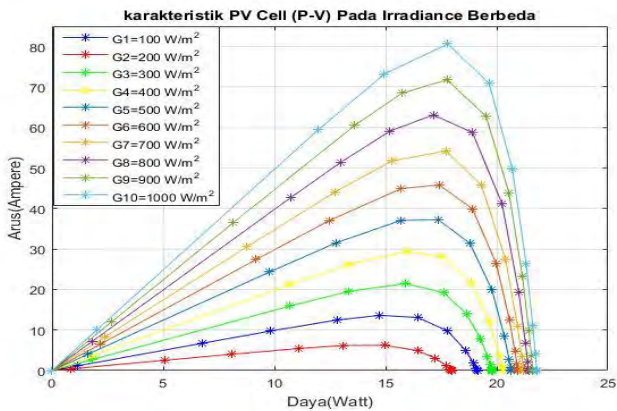
No.	Parameter	Nilai <i>datasheet</i> Modul PV	Nilai Pengujian modul PV	Akurasi Pengujian
6	K <sub>v</sub> (mV/°C)	-3,2	-3,2	100 %
7.	N <sub>s</sub>	36	36	100.%
8.	P <sub>max</sub> (W)	80	80,03	99.99%

Pada table 3.1 modul PV GH80P-18 3 nilai akurasi pengujian dari delapan parameter diatas apabila dirata-rata memiliki nilai akurasi rata-rata 99,98%. Dengan akurasi yang memiliki nilai 99,98% menjadikan pemodelan *Photovoltaic* dengan *ideal double diode model* memiliki akurasi yang baik sehingga dapat diterapkan pada keadaan real. Modul PV GH80P-18 3 dengan kapasitas 80 Watt memiliki cell sebanyak 36 cell yang disusun secara seri dengan suhu operasi normal antara -40 °Celsius sampai 80 °Celsius. Pengertian *Normal Operating Cell Temp* (NOCT) adalah pengujian standart yang disesuaikan dengan kondisi operasional *Photovoltaic cell* didefinisikan suhu yang dicapai oleh cell modul saat *open circuit* dengan mengasumsikan radiasi 800W/m<sup>2</sup>, Suhu lingkungan 20 °C dan kecepatan angina 1 m/s dengan modul dengan sudut kemiringan 45°.

Model *photovolitic dioble diode ideal* dilakukan untuk mendapatkan hasil permodelan yang sesuai dengan keadaan modul Fotovoltaik sebenarnya. Nilai daya digunakan sebagai nilai referensi pada MPPT. Selain nilai daya juga diperoleh nilai tegangan dan arus yang digunakan referensi dari *boost converter*. Kurva karakteristik *Photovoltaic double diode model* pada keadaan normal dengan *irradiance* 100 W/m<sup>2</sup> sampai 1000 W/m<sup>2</sup> di temperatur 25°C ditunjukkan pada Gambar 3.8. Untuk karakteristik kurva tegangan dan arus (V-I). Sedangkan Gambar 3.9 menunjukkan karakteristik kurva tegangan dan daya (V-P). Pada Gambar 3.8 Nilai irradian semakin kecil maka nilai arus yang dibangkitkan oleh modul *Photovoltaic* semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin kecil nilai irradian yang diterima oleh *photovoltaic* maka energi yang diubah ke energi listrik juga semakin kecil. Maka persamaan 2.14 terbukti nilai G (Irradian) berbanding lurus dengan arus yang dibangkitkan oleh *Photovoltaic* ( $I_{PV}$ ).



**Gambar 3. 8** Kurva karakteristik V-I pada berbagai nilai *irradiance* yang berbeda dari 100  $\text{W/m}^2$  sampai 1000  $\text{W/m}^2$



**Gambar 3. 9** Kurva karakteristik P-V pada berbagai nilai *irradiance* dari 100  $\text{W/m}^2$  sampai 1000  $\text{W/m}^2$

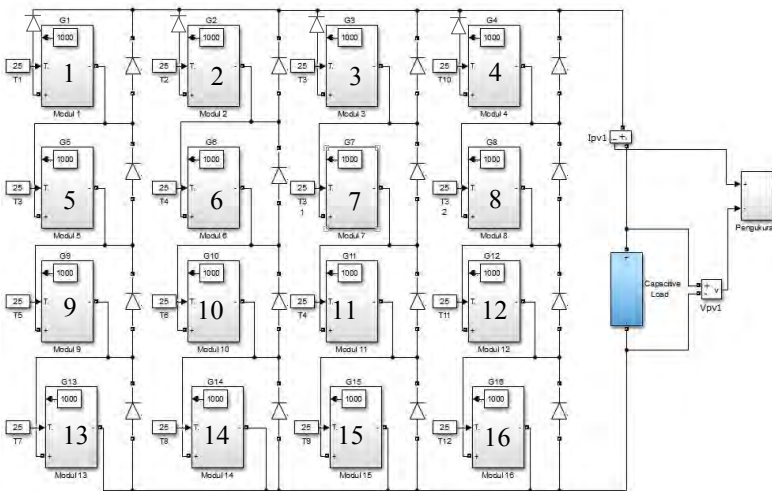
Pada Gambar 3.8 ditunjukkan jika *irradiance* semakin naik maka arus yang dibangkitkan oleh modul *Photovoltaic* menjadi semakin besar sehingga efisiensi sistem juga semakin baik. Hal ini berbeda dengan pengaruh suhu lingkungan disekitar *Photovoltaic*. Semakin naik suhu lingkungan *Photovoltaic* maka semakin kecil arus pembangkitan daya. Hal ini dikarenakan Suhu yang mengenai *Photovoltaic modul*

mengakibatkan rata-rata pembangkitan photon menjadi bertambah namun *reverse saturation current* bertambah semakin cepat dan hal ini mengurangi *band gap*. Perubahan pada *band gap* menyebabkan perubahan marginal pada arus yang dihasilkan, tapi perubahan besar pada tegangan. *Band gap* merupakan jumlah energi foton yang dibutuhkan untuk mengetuk (*knock*) sebuah electron dari atom Silicon (Si) yaitu sebesar 1,1 *electronvolt* (eV) .

Hal serupa juga terjadi pada kurva karakteristik V-P yang ditunjukkan pada Gambar 3.9, jika nilai suhu dinaikkan maka nilai daya maksimum ( $P_{max}$ ) yang dihasilkan juga semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin suhunya naik maka arus yang dibangkitkan oleh modul Fotovoltaik menjadi berkurang, Sehingga perkurangannya arus berdampak pada berkurangnya daya yang dihasilkan oleh modul Fotovoltaik.

### 3.2.2 Pemodelan Photovoltaic array

Pemodelan *Photovoltaic array* merupakan gabungan dari beberapa string modul Fotovoltaik ditunjukkan pada Gambar 3.10.

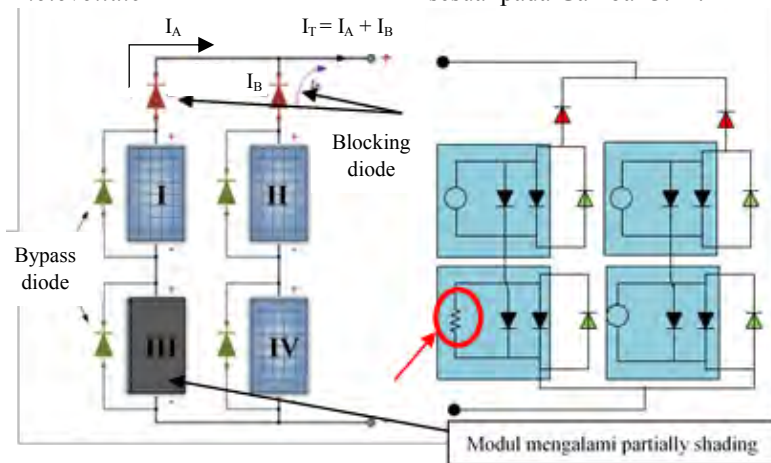


Gambar 3. 10 Pemodelan Photovolitic array

String merupakan susunan dari beberapa modul Fotovoltaik yang dipasang secara seri maupun paralel. Pada pemodelan *Photovoltaic array* tersusun dari empat string masing-masing string terdiri dari empat Fotovoltaik. Tujuan dari disusunnya *Photovoltaic array* supaya sistem memiliki daya *output* lebih besar yang disesuaikan dengan beban sistem.

### 3.2.3 Pemodelan *Photovoltaic Partially Shading* Dengan *Bypass* dan *Blocking Diode*

Pada Fotovoltaik pada keadaan *partially shading* karena sinar matahari yang menuju ke panel Fotovoltaik terhalangi oleh suatu benda, sehingga sebagian cell dari Fotovoltaik tidak mampu membangkitkan arus. Sehingga *cell* tersebut berubah menjadi beban dan mengalami dissipasi daya berupa panas, jika dibiarkan terus-menerus akan merusak *Photovoltaic cell*. Hal ini ditunjukkan sesuai pada Gambar 3.11.

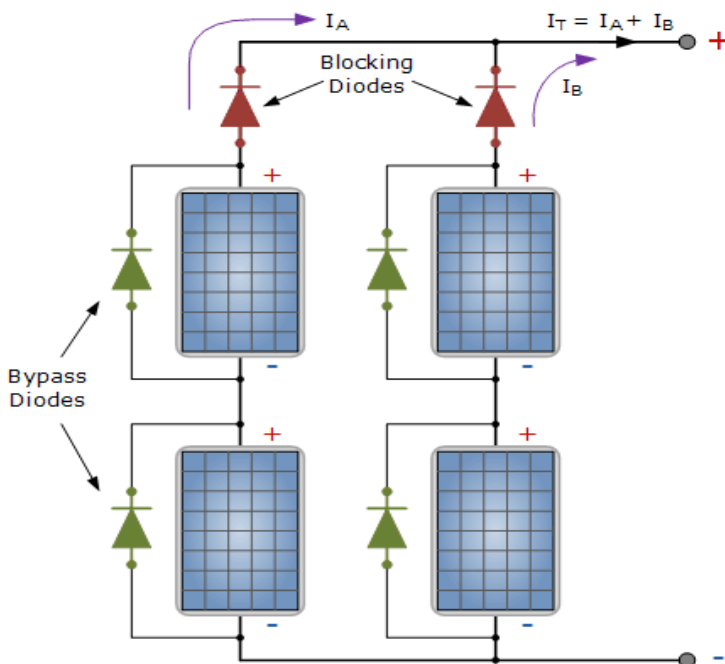


**Gambar 3. 11** *Photovoltaic cell* yang mengalami *partially shading condition*

Pada Gambar 3.11 di atas terdapat komponen *diode bypass* yang dipasang paralel dengan modul. Fungsi dari *bypass diode* adalah untuk mengalirkan arus saat modul dalam keadaan *partially shading* maupun disaat modul terdapat beberapa *cell* yang rusak. Adanya beberapa *cell* yang rusak menjadikan *cell* tidak mampu menghasilkan dan mengalirkan arus listrik. Pada modul III yang mengalami *partially shading* sehingga

modul berubah menjadi beban pada gambar ditunjukkan lingkaran merah. Adanya *bypass diode* ditunjukkan pada Gambar 3.11 yang dipasang parallel dengan modul, bertujuan untuk melewati arus saat cell tidak mampu menghasilkan arus listrik. Sehingga arus pada keadaan normal melewati *current source* (sumber arus) maka arus akan di-*bypass* (dilewatkan) melewati *bypass diode*. Sehingga *bypass diode* merupakan piranti yang penting dan harus dipasang pada setiap modul Karena berfungsi sebagai rangkaian pengaman saat *partially shading condition*.

Selain dipasang *bypass diode*, rangkaian *Photovoltaic array* juga dipasang *blocking diode* yang ditunjukkan diode warna merah pada Gambar 3.12. *Blocking diode* merupakan piranti yang berfungsi sebagai *blocking* arus saat sistem Fotovoltaik dilengkapi dengan baterai penyimpan energi seperti accumulator dan baterai isi ulang. Cara kerja *blocking diode* ditunjukkan pada Gambar 3.12



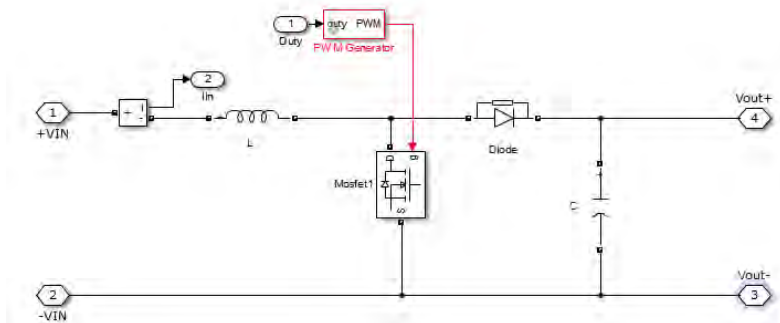
Gambar 3. 12 Cara kerja blocking diode



Pada saat siang hari Fotovoltaik merupakan sumber listrik yang mengalirkan arus pada sistem dan menyimpan energi di baterai penyimpanan, namun pada saat malam hari Karena tidak ada sinar matahari maka Fotovoltaik tidak mampu mentranfer energi ke sistem. Sehingga baterai yang telah terisi penuh menjadi sumber energi yang mensupply energi listrik ke sistem. Untuk menghindari arus balik dari baterai menuju ke Fotovoltaik maka dipasang *blocking diode*. Karena jika sistem tidak dipasang *blocking diode* arus akan mengalir menuju panel Fotovoltaik pada keadaan ini panel berubah menjadi beban pada sistem.

### 3.2.4 Pemodelan *Boost Converter*

Sistem Fotovoltaik pada simulasi ini menggunakan *Boost converter* yang berfungsi untuk menaikkan level tegangan yang keluar dari modul Fotovoltaik dan salurkan ke beban. Komponen utama terdiri dari MOSFET, inductor, resistor, dan kapasitor. Gambar 3.13 merupakan rangkaian *boost converter* di Simulink Matlab.



**Gambar 3. 13** Simulasi *boost converter* di Simulink Matlab.

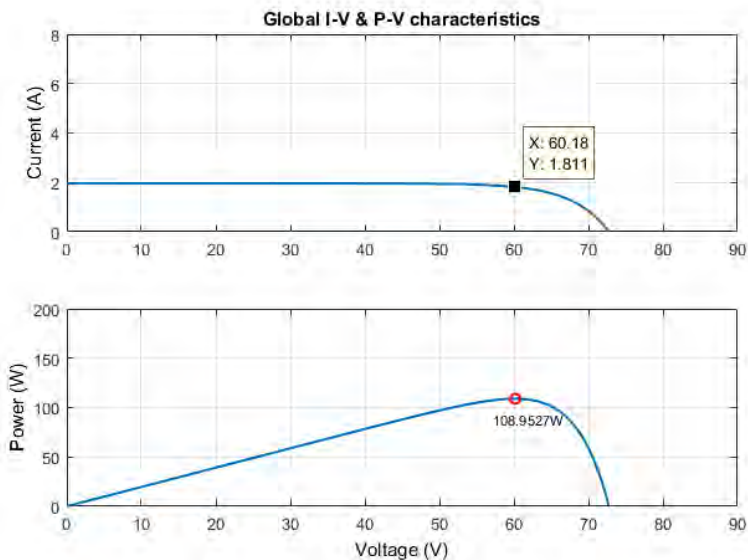
*Boost converter* menggunakan MOSFET yang berfungsi *switching boost converter* dan sebagai mengatur frekuensi pada *boost converter*. Sinyal frekuensi berupa PWM masuk kedalam MOSFET melalui pin *gate* yang pada Gambar 3.13 pin ditunjukkan dengan huruf g. Untuk menentukan Spesifikasi *boost converter* harus dilakukan beberapa tahap yaitu:

1. Menentukan range tegangan input ( $V_{in}$ ) pada *boost converter*

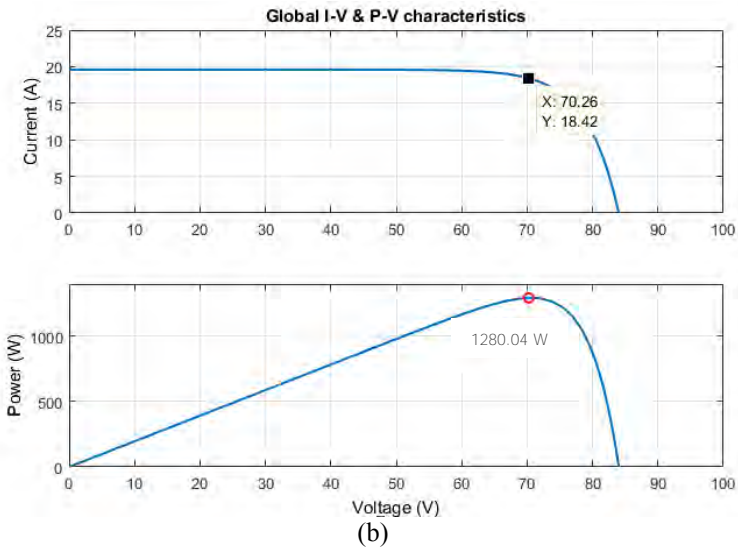
Untuk menentukan range tegangan dilakukan pengukuran array pv. Pada tugas akhir kali ini menggunakan enam belas modul pv dengan array berukuran 4x4. Pengukuran array pv saat nilai irradiance (G) minimal yaitu 100 Watt/m<sup>2</sup> yang menghasilkan  $V_{input}$  minimal , Pengukuran nilai irradiance maksimal yaitu 1000 Watt/m<sup>2</sup> dan pengukuran pada kondisi teganan *open circuit* guna menghasilkan nilai  $V_{input}$  maksimum. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 3.3 dan Gambar 3.14

**Tabel 3. 2** Pengukuran Kondisi Array PV

Pengukuran PV	Tegangan Volt)	Daya (Watt)
Irradiance 100 W/m <sup>2</sup>	60,18	108,953
Irradiance 1000 W/m <sup>2</sup>	70,26	1280,04
Pengukuran Tegangan Overcircuit ( $V_{oc}$ )	84	-



(a)



**Gambar 3. 14** Grafik pengukuran array photovoltaic (a) ketika  $G = 100 \text{ W/m}^2$ , (b) ketika  $G = 1000 \text{ W/m}^2$

Berdasarkan Tabel 3.2 tegangan masukan ( $V_{in}$ ) *boost converter* antara 60,18 Volt sampai 85 Volt, dengan frekuensi *switching* 100kHz , Tegangan Output 120 Volt. Tegangan *output boost converter* disesuaikan dengan beban sistem yaitu berupa baterai 120 Volt. Spesifikasi baterai yang dipilih terdapat pada lampiran II dengan tegangan nominal 12 Volt, arusnya 2,1 Ah berjumlah 50 buah. Baterai dipasang sepuluh buah baterai secara seri dan lima buah secara parallel. Sehingga tegangan masukan yang dibutuhkan 120 Volt dengan arus per satuan jamnya adalah 10,5 Ah sesuai dengan perhitungan dibawah ini.

Tegangan nominal baterai : 12 Volt x 10 =120 Volt

Arus bersatuan jam : 2,1 Ah x 5 = 10,5 Ah

Baterai yang digunakan merk POWER FIT S300 yang spesifikasi baterai ditunjukkan pada lampiran II

2. Menentukan parameter *boost converter* :

$$\Delta i_L = 0,04 \times I_L$$

$$\Delta V = 0.02 \times V_o$$

$$I_o = P_o / V_o$$

$$f = 100000 \text{ Hz} = 100\text{KHz}$$

$$V_o = 120 \text{ Volt}$$

### Dutycycle (D):

$$V_{min} = 60,18 \text{ Volt}$$

$$V_{max} = 85 \text{ Volt}$$

$$V_o = 120 \text{ Volt}$$

$$I_L = 1.881 \text{ A}$$

$$V_o = \frac{V_s}{1-D},$$

$$1-D = \frac{V_s}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{V_o}{V_s}$$

$$D = 1 - \frac{60.18}{120}$$

$$D = 0.4985$$

$$I_o = \frac{V_{in} \times I_{in}}{V_o} \\ = \frac{60,16 \times 1,811}{120} \\ = 0.9079 \text{ A}$$

$$V_o = 120 \text{ Volt}$$

$$I_o = 10.667 \text{ A}$$

$$V_o = \frac{V_s}{1-D},$$

$$1-D = \frac{V_s}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{V_o}{V_s}$$

$$D = 1 - \frac{85}{120}$$

$$D = 0.29167$$

$$I_L = \frac{V_{ox} I_o}{V_{in}} \\ = \frac{120 \times 10.667}{85} \\ = 15,059 \text{ A}$$

$$\Delta i_L = 0,04 \times I_L \\ = 0,04 \times 1,811 \text{ A} \\ = 0,07244 \text{ A}$$

$$\Delta i_L = 0,04 \times I_L \\ = 0,04 \times 15,059 \text{ A} \\ = 0.6 \text{ A}$$

### Induktor (L)

$$\Delta i_L = \frac{V_s \times D}{f \times L}$$

$$L = \frac{V_s \times D}{f \times \Delta i_L}$$

$$L = \frac{60.18 \times 0.4985}{100000 \times 0.07244}$$

$$L = 4141,32 \text{ } \mu\text{H}$$

### Induktor (L)

$$\Delta i_L = \frac{V_s \times D}{f \times L}$$

$$L = \frac{V_s \times D}{f \times \Delta i_L}$$

$$L = \frac{85 \times 0.29167}{100000 \times 0.6}$$

$$L = 411,558 \text{ } \mu\text{H}$$

### Capasitor (C)

$$C = \frac{D}{\left(\frac{V_o}{I_o}\right)\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)f} \\ = \frac{D}{\left(\frac{\Delta V_o}{I_o}\right)f} \\ = \frac{0.4985}{\left(\frac{0.02 \times 120}{0.9079}\right) \times 100000} \\ = 1.8857 \text{ } \mu\text{F}$$

### Capasitor (C)

$$C = \frac{D}{\left(\frac{V_o}{I_o}\right)\left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right)f} \\ = \frac{D}{\left(\frac{\Delta V_o}{I_o}\right)f} \\ = \frac{0.29167}{\left(\frac{0.02 \times 120}{10.667}\right) \times 100000} \\ = 12,9630 \text{ } \mu\text{F}$$

Sehingga pada perhitungan di atas dipilih nilai Induktor terbesar yaitu 4550  $\mu\text{H}$  dan nilai Capacitor terbesar yaitu 55  $\mu\text{F}$ .

Capasitor pada *boost converter* memiliki nilai 55  $\mu\text{F}$  berfungsi untuk menentukan desain *ripple* tegangan yang dihasilkan oleh *boost converter* semakin besar nilai dari kapasitansi capasitor maka *ripple* tegangan yang dihasilkan oleh *boost* semakin kecil. Selain itu besar *ripple* tegangan juga dipengaruhi oleh besar periode ( $T$ ) , periode berbanding terbalik dengan nilai kapasitansi pada capasitor sehingga semakin besar nilai periode maka *ripple* tegangan yang dihasilkan juga semakin besar.

Induktor pada *boost converter* memiliki nilai 4550  $\mu\text{H}$ , fungsi untuk menentukan nilai *ripple* arus pada *boost converter*. *Ripple* arus adalah batas nilai puncak arus tertinggi dan terendah yang dibangkitkan oleh *boost converter*. Semakin kecil nilai *ripple* arus yang dihasilkan oleh *boost* maka semakin bagus kualitas arus yang dibangkitkan yang selanjutnya disalurkan ke beban. Pada tugas akhir ini nilai beban akan dilakukan perubahan berdasarkan skenario kondisi Fotovoltaik yang terbayang. Besar nilai *ripple* arus ditentukan oleh empat parameter yaitu tegangan sumber ( $V_s$ ), *Duty Cycle*, nila inductor ( $I_L$ ) , dan besar frekuensi. Semakin besar nila *inductance* pada induktor maka nilai *ripple* arus yang dihasilkan semakin kecil kerana *ripple* arus berbanding terbalik dengan besarnya inductance. Hasil simulasi *boost converter* yang dibandingkan dengan perhitungan manual ditunjukkan pada table 3.4 dibawah ini.

**Tabel 3. 3** Spesifikasi *boost converter*

Spesifikasi	Nilai
Capasitor (C)	55 $\mu\text{F}$
Induktor (L)	4550 $\mu\text{H}$
<i>Ripple</i> Arus ( $\Delta I$ )	0.04 $I_L$
<i>Ripple</i> Tegangan ( $\Delta V$ )	0,02 $V_0$
$V_{\text{output}}$ ( $V_o$ )	120 V
<i>Frequensi swching</i>	100.000 Hz
V input ( $V_{\text{in}}$ )	60.18 Volt-85 Volt
Daya Output maksimal ( $P_{\text{out}}$ )	1280,04 Watt

Spesifikasi *boost converter* pada Tabel 3.4 di atas untuk membuktikan spesifikasi yang dipilih sudah benar maka dilakukan

pengujian dengan dilakukan simulasi. Simulasi dilakukan dua kali yaitu saat *boost converter* memiliki batas sumber minimal 60.18 Volt dan saat sumber *boost converter* memiliki batas sumber maksimal yaitu 120 Volt. Pada pengujian ini beban *boost converter* berupa Resistif murni.

### 3.2.4.1 Simulasi *Boost Converter* pada Tegangan Masukan Minimal (60.18 Volt)

Pada pengujian ini sesuai dengan Tabel 3.3 maka didapatkan spesifikasi *Boost converter* sebagai berikut:

$$V_{\text{input}} = 60,18 \text{ Volt}$$

$$L = 4550 \text{ } \mu\text{H}$$

$$C = 55 \text{ } \mu\text{F}$$

$$D = 0.4985$$

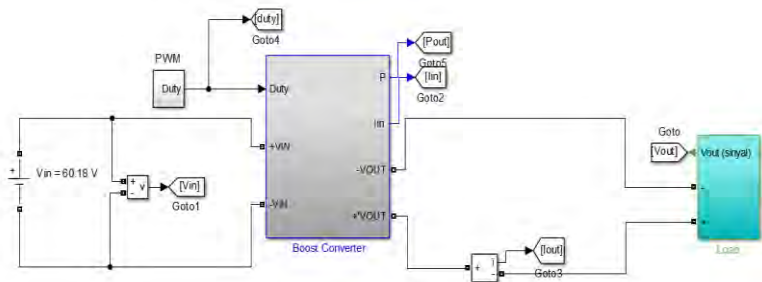
$$V_o = 120 \text{ Volt}$$

$$\Delta i_L = 0,04 \times I_L$$

$$\Delta V_o = 0,02 \times V_o$$

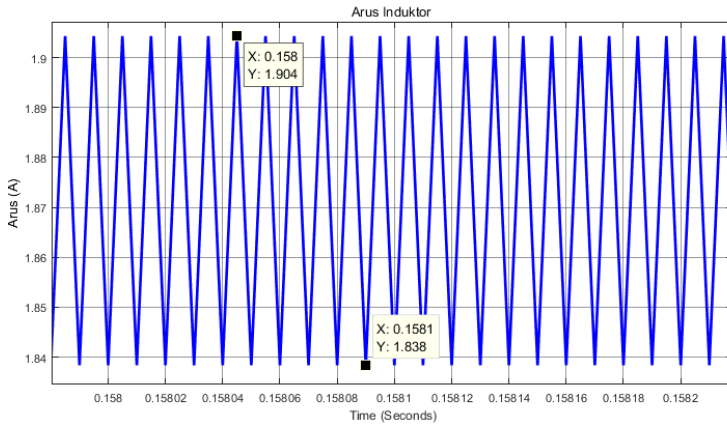
$$\begin{aligned} R &= \frac{V_o}{I_o} \\ &= \frac{120}{0.9079} \\ &= 132,173 \text{ } \Omega \\ &= 0,132173 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan Spesifikasi *Boost converter* dilakukan pengujian simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.15 di bawah ini dengan sumber tegangan 60,18 Volt .



**Gambar 3. 15** Simulasi *Boost Converter* dengan sumber Tegangan minimal

Berdasarkan pengujian simulasi pada Gambar 3.15 didapatkan hasil pengujian sinyal arus pada induktor terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 3.16.



**Gambar 3. 16** Sinyal arus induktor terhadap waktu

Pada Gambar 3.16 didapatkan arus maksimal pada pengujian memiliki nilai 1,904A. Sedangkan nilai arus minimal adalah 1,838 A. Nilai arus minimal dan arus maksimal diperoleh berdasarkan pada persamaan 2.13 dan 2.14

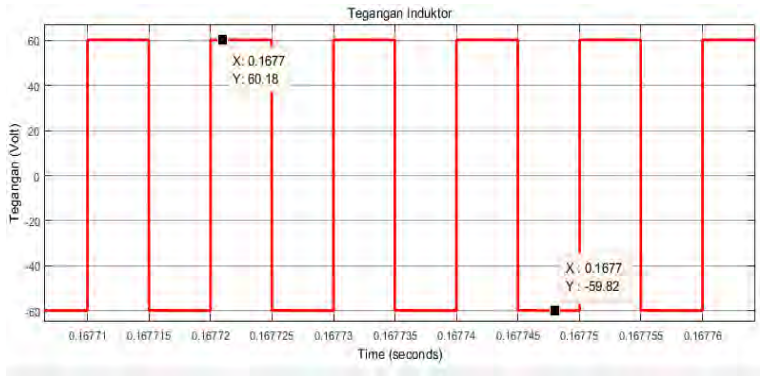
$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\
 &= 1,871 - \frac{0,066}{2} A \\
 &= 1,871 + 0,033 A \\
 &= 1,904 A
 \end{aligned}$$

Arus minimal:

$$\begin{aligned}
 I_{min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \\
 &= 1,871 - \frac{0,066}{2} A \\
 &= 1,871 - 0,033 A \\
 &= 1,838 A
 \end{aligned}$$

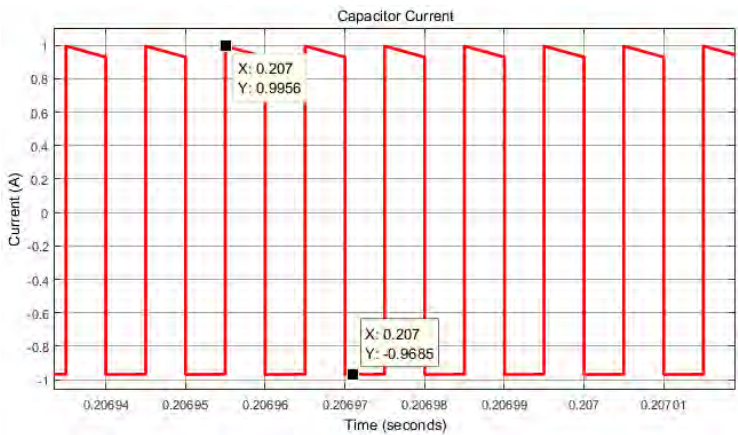
Hasil simulasi sinyal tegangan pada induktor terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 3.15. Pada gambar tersebut ditunjukkan nilai

Tegangan Induktor 60,18 Volt merupakan nilai tegangan input dari sumber. Sedangkan nilai tegangan induktor minimum adalah -59,82 Volt. Nilai tersebut merupakan pengurangan dari tegangan input dikurangi dengan tegangan output ( $V_{\text{input}} - V_{\text{output}}$ ) sehingga mendapatkan nilai -59,82 Volt.



**Gambar 3. 17** Sinyal tegangan induktor terhadap waktu

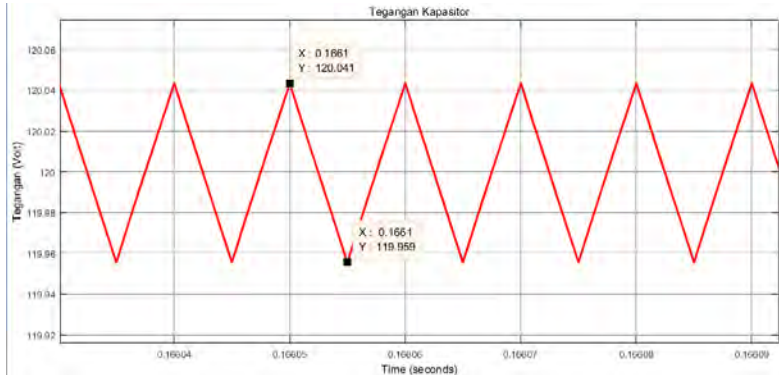
Pada pengujian *boost conveter* pada Gambar 3.15 dihasilkan grafik sinyal arus kapasitor terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 3.18.



**Gambar 3. 18** Sinyal arus kapasitor terhadap waktu



Hasil pengujian sinyal tegangan pada kapasitor terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 3.19.



**Gambar 3. 19** Sinyal Tegangan kapasitor terhadap waktu

Pada gambar 3.17 ditunjukkan hasil *ripple* tegangan maksimal pada kapasitor yaitu 120,041 Volt dan *ripple* tegangan minimal adalah 119,959 Volt. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan persamaan 2.42 dan 2.43 dengan nilai *ripple* tegangan diperoleh berdasarkan persamaan 2.40

Rippel Tegangan:

$$\Delta V_o = \frac{V_o D}{RCf}$$

$$\Delta V_o = \frac{120 \times 0.4985}{132,173 \times 55 \mu F \times 100 KHZ}$$

$$\Delta V_o = \frac{59,82}{726,9515}$$

$$\Delta V_o = 0,0822 \text{ Volt}$$

Tegangan maksimal:

$$V_{max} = V_o + \frac{\Delta V_o}{2}$$

$$= 120 + \frac{0,0822}{2}$$

$$= 120 + 0,0411$$

$$= 120,0411 \text{ Volt}$$

Tegangan minimal:

$$\begin{aligned}
 V_{min} &= V_o - \frac{\Delta V_o}{2} \\
 &= 120 - \frac{0,0822}{2} \\
 &= 120 - 0,0411 \\
 &= 119,959 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

Pada pengujian *boost conveter* pada Gambar 3.15 dihasilkan grafik arus *input* dan arus *output* yang ditunjukkan pada Gambar 3.18. Pada Gambar tersebut didapatkan arus *input* sebesar 1,871 A dengan nilai *ripple* arus ( $\Delta i_L$ ) adalah 0,066 A. Untuk membuktikan *boost converter* memiliki spesifikasi yang telah ditentukan, maka nilai *ripple* arus tidak lebih dari atau sama dengan 0,04 dari nilai arus inductor (simulasi *ripple* arus  $\leq \Delta i_L = 0,04 \times I_L$ ).

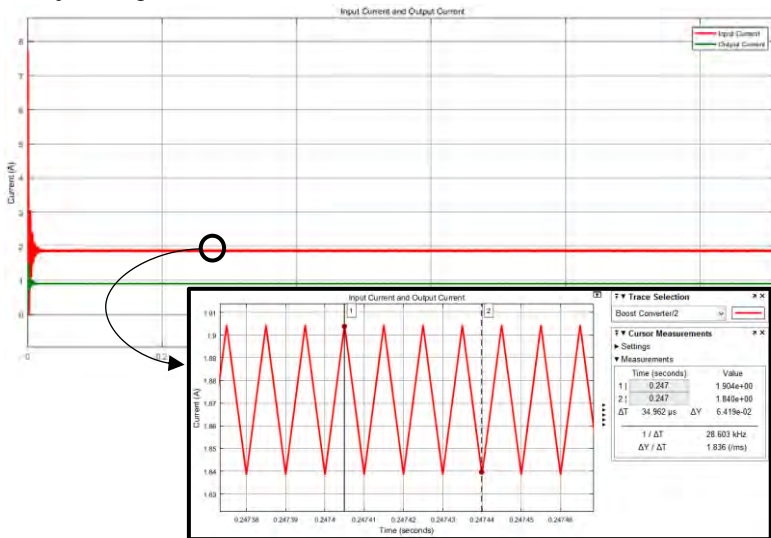
simulasi *ripple* arus  $\leq$  *ripple* arus pada spesifikasi *boost converter*

simulasi *ripple* arus  $\leq \Delta i_L = 0,04 \times I_L$

$\Delta i_L = 0,066 \text{ A} \leq \Delta i_L = 0,04 \times 1,871 \text{ A}$

$\Delta i_L = 0,066 \text{ A} \leq \Delta i_L = 0,07484 \text{ A}$

Pada pengujian pada *boost converter* dengan tegangan minimal didapat nilai *ripple* arus lebih kecil dari pada spesifikasi yang ditentukan ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3. 20 Grafik Arus pengujian dan Arus *ripple* boost converter

Sedangkan Grafik tegangan *output* dan *ripple* tegangan *output* ditunjukkan pada Gambar 3.21. Pada gambar tersebut ditunjukkan tegangan output *boost converter* memiliki nilai 120 Volt dengan Tegangan *input* sebesar 60,18 Volt. Untuk membuktikan *boost converter* memiliki spesifikasi yang telah ditentukan, maka nilai *ripple* tegangan simulasi tidak lebih dari atau sama dengan 0,02 dari nilai tegangan *output*. (simulasi *ripple* tegangan  $\leq \Delta V_o = 0,02 \times V_o$  ).

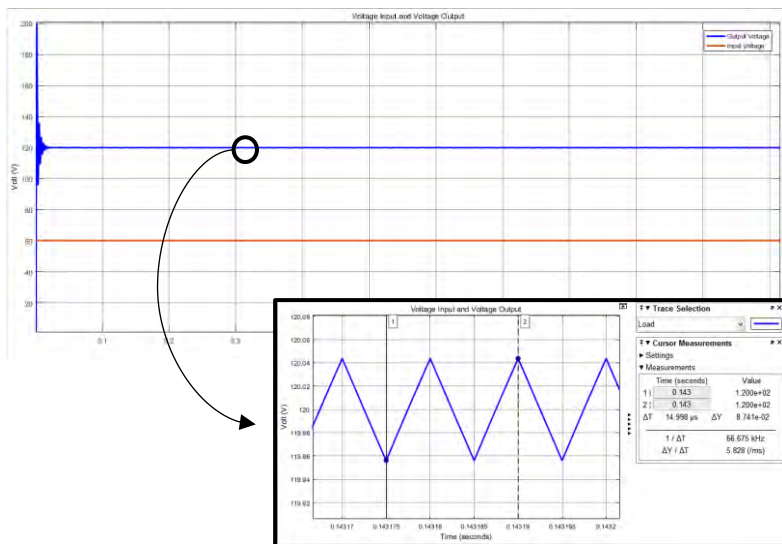
simulasi *ripple* tegangan  $\leq$  *ripple* tegangan spesifikasi *boost converter*

simulasi *ripple* Tegangan  $\leq \Delta V_o = 0,02 \times V_o$

$\Delta V_o = 0,0822 \text{ Volt} \leq \Delta V_o = 0,02 \times 120 \text{ Volt}$

$\Delta V_o = 0,0822 \text{ Volt} \leq \Delta V_o = 2.4 \text{ Volt}$

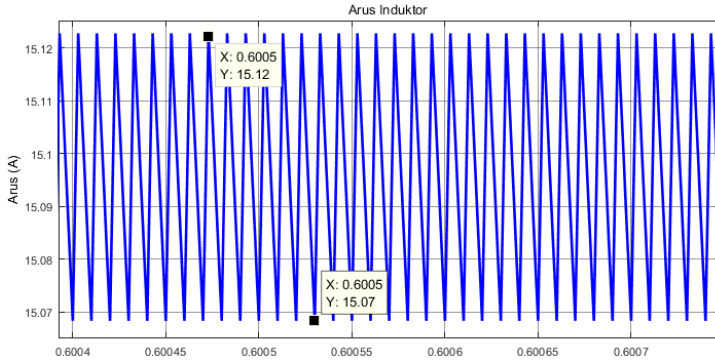
Pada pengujian pada *boost converter* dengan tegangan minimal didapat nilai *ripple* tegangan lebih kecil dari pada spesifikasi yang ditentukan. Sehingga disimpulkan *boost converter* dengan range sumber tegangan minimal memiliki spesifikasi yang sesuai. Grafik tegangan dan *ripple* tegangan *boost converter* ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3. 21 Grafik Tegangan dan *ripple* tegangan pengujian *boost converter*



Pada pengujian *boost converter* pada Gambar 3.22 dihasilkan grafik sinyal arus induktor terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 3.23.



**Gambar 3. 23** Sinyal arus induktor terhadap waktu

Pada Gambar 3.21 didapatkan arus maksimal pada pengujian memiliki nilai 15,12 A. Sedangkan nilai arus minimal adalah 15,07 A. Nilai arus minimal dan arus maksimal diperoleh berdasarkan pada persamaan 2.13 dan 2.14

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\
 I_L &= \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \\
 &= \frac{15,12 + 15,07}{2} \text{ A} \\
 &= 15,095 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Rippel arus :

$$\begin{aligned}
 \Delta i_L &= \frac{V_s \times D}{f \times L} \\
 &= \frac{85 \times 0.29167}{100\text{kHz} \times 4550 \text{ }\mu\text{H}} \\
 &= 0,05 \text{ A}
 \end{aligned}$$

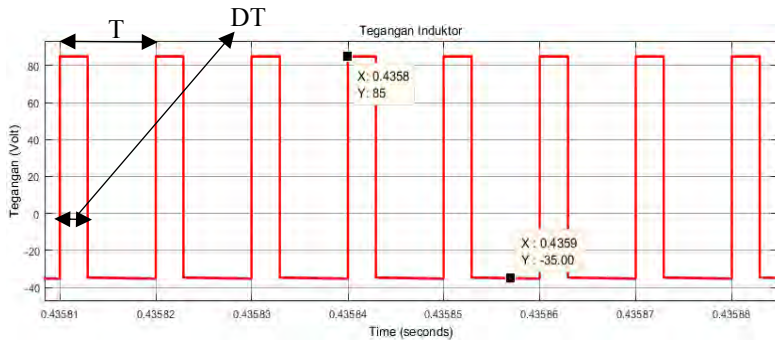
Arus maksimal :

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \\
 &= 15,095 + \frac{0,05}{2} \text{ A} \\
 &= 15,095 + 0,025 \text{ A} \\
 &= 15,12 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Arus minimal :

$$\begin{aligned}
 I_{min} &= I_L - \frac{\Delta I_L}{2} \\
 &= 15,095 - \frac{0,05}{2} A \\
 &= 15,095 + 0,025 A \\
 &= 15,07 A
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian sinyal tegangan pada induktor terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 3.24.



**Gambar 3. 24** Sinyal Tegangan induktor terhadap waktu

Pada Gambar 3.24 ditunjukkan bahwa nilai tegangan induktor maksimal adalah 85 Volt. Nilai tersebut merupakan nilai tegangan *input* pada *boost converter* sedangkan tegangan minimal adalah -35 Volt . Nilai tegangan minimal diperoleh dari selisih antara nilai tegangan *input* dengan tegangan *output* ( $V_{input} - V_{out}$ ). Sehingga didapatkan nilai -35 Volt.

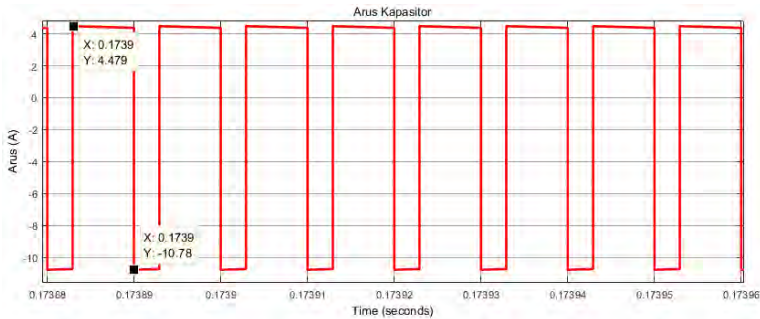
Pada Gambar 3.24 didapatkan nilai Periode sistem (T) adalah 0,00001 detik. Diperoleh dari:

$$T = \frac{1}{frekuensi} = \frac{1}{100.000} = 0,00001 \text{ detik.}$$

Sedangkan waktu yang dibutuhkan induktor untuk mengalami pengisian (*charge*) sama dengan waktu saat saklar tersambung (DT) didapat dari rumus:

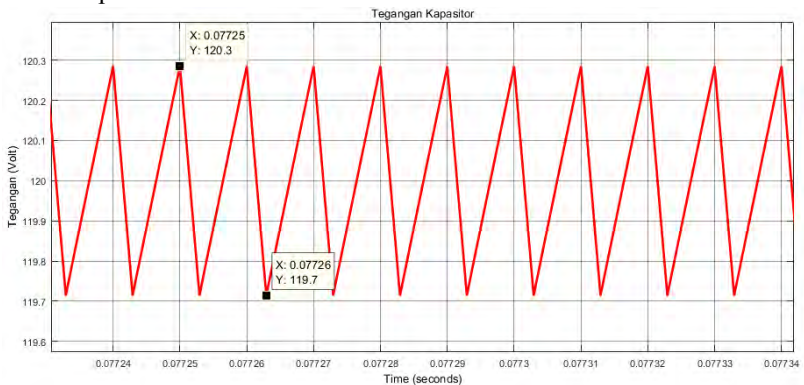
$$\begin{aligned}
 \text{Waktu saklar tersambung} &= DxT \\
 &= 0,29167 \times 0,00001 = 0,2 \times 10^{-5} \text{ detik.}
 \end{aligned}$$

Pada pengujian *boost converter* pada Gambar 3.22 dihasilkan grafik sinyal arus kapasitor terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 3.25.



**Gambar 3. 25** Sinyal arus kapasitor terhadap waktu

Pada gambar 3.26 ditunjukkan hasil grafik sinyal tegangan kapasitor terhadap waktu.



**Gambar 3. 26** Sinyal tegangan kapasitor terhadap waktu

Pada gambar 3.26 ditunjukkan hasil *ripple* tegangan maksimal pada kapasitor yaitu 120,3 Volt dan *ripple* tegangan minimal adalah 119,7 Volt. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan 2.22 dan 2.12 dengan nilai *ripple* tegangan diperoleh berdasarkan persamaan 2.18

$$\Delta V_o = \frac{V_o D}{RCf}$$

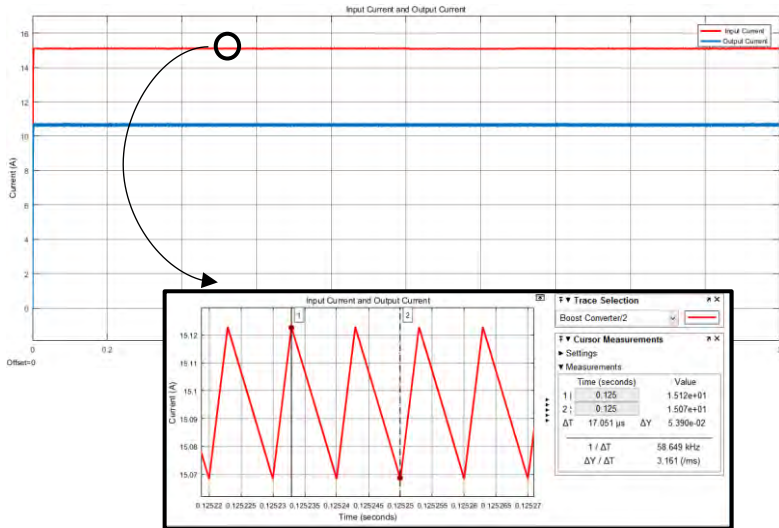
$$\begin{aligned}
\Delta V_o &= \frac{120 \times 0.29167}{11,2496 \times 55 \mu F \times 100 KHZ} \\
\Delta V_o &= \frac{35,0004}{11,2496 \times 55 \mu F \times 100.000 HZ} \\
\Delta V_o &= \frac{35,0004}{1124960 \times 55 \mu F} \\
\Delta V_o &= \frac{35,0004}{61,8728} \\
\Delta V_o &= \frac{35,0004}{61,8728} \\
\Delta V_o &= 0,57 \cong 0,6 \text{ Volt} \\
V_{max} &= V_o + \frac{\Delta V_o}{2} \\
&= 120 + \frac{0,6}{2} \\
&= 120 + 0,3 \\
&= 120,3 \text{ Volt} \\
V_{min} &= V_o - \frac{\Delta V_o}{2} \\
&= 120 - \frac{0,6}{2} \\
&= 119,7 \text{ Volt}
\end{aligned}$$

Pada pengujian *boost converter* pada Gambar 3.20 dihasilkan grafik arus *input* dan arus *output* yang ditunjukkan pada Gambar 3.25. Pada Gambar tersebut didapatkan arus *input* sebesar 15,095 A dengan nilai *ripple* arus ( $\Delta i_L$ ) adalah 0,05 A. Untuk membuktikan *boost converter* memiliki spesifikasi yang telah ditentukan, maka nilai *ripple* arus tidak lebih dari atau sama dengan 0,04 dari nilai arus inductor (simulasi *ripple* arus  $\leq \Delta i_L = 0,04 \times I_L$ ).

$$\begin{aligned}
\text{simulasi ripple arus} &\leq \text{ripple arus pada spesifikasi boost converter} \\
\text{simulasi ripple arus} &\leq \Delta i_L = 0,04 \times I_L \\
\Delta i_L = 0,05 \text{ A} &\leq \Delta i_L = 0,04 \times 15,095 \text{ A} \\
\Delta i_L = 0,05 \text{ A} &\leq \Delta i_L = 0,6 \text{ A}
\end{aligned}$$

Pada pengujian simulasi di MATLAB Simulink *boost converter* dengan tegangan maksimum didapat nilai *ripple* arus pengujian lebih kecil dari pada spesifikasi yang ditentukan ditunjukkan pada Gambar 3.27.





**Gambar 3. 27** Grafik Arus pengujian dan Arus ripple boost converter

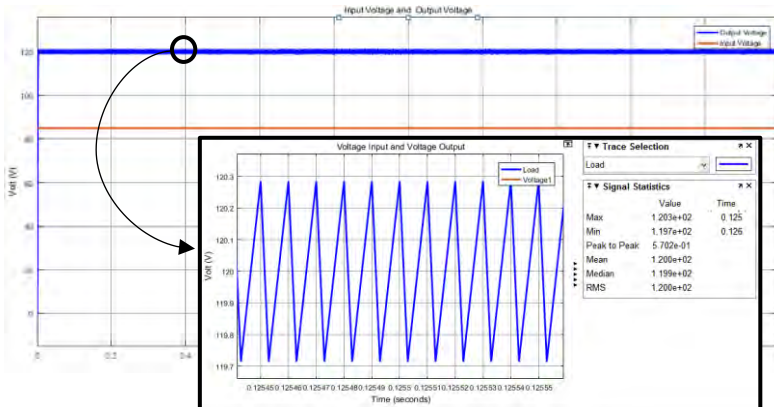
Sedangkan Grafik tegangan *output* dan *ripple* tegangan *output* ditunjukkan pada Gambar 3.28. Pada gambar tersebut ditunjukkan tegangan output *boost converter* memiliki nilai 120 Volt dengan Tegangan *input* sebesar 85 Volt. . Untuk membuktikan *boost converter* memiliki spesifikasi yang telah ditentukan, maka nilai *ripple* tegangan simulasi tidak lebih dari atau sama dengan 0,02 dari nilai tegangan *output* (simulasi *ripple* tegangan  $\leq \Delta V_o = 0,02 \times V_o$  ).

simulasi *ripple* tegangan  $\leq$  *ripple* tegangan spesifikasi *boost converter*  
 simulasi *ripple* Tegangan  $\leq \Delta V_o = 0,02 \times V_o$

$$\Delta V_o = 0,6 \text{ Volt} \leq \Delta V_o = 0,02 \times 120 \text{ A}$$

$$\Delta V_o = 0,6 \text{ Volt} \leq \Delta V_o = 2.4 \text{ A}$$

Pada pengujian pada *boost converter* dengan tegangan maksimal didapat nilai *ripple* tegangan lebih kecil dari pada spesifikasi yang ditentukan. Sehingga disimpulkan *boost converter* dengan range sumber tegangan maksimal memiliki spesifikasi yang sesuai. Grafik tegangan dan *ripple* tegangan *boost converter* ditunjukkan pada Gambar 3.28.



**Gambar 3. 28** Grafik tegangan dan ripple tegangan pengujian *boost converter*

Pada pengujian *boost converter* dengan range tegangan *input* minimal dan tegangan *input* maksimal. Sehingga dapat disimpulkan *boost converter* memiliki spesifikasi yang telah ditentukan dan dapat digunakan sebagai *converter* sistem Fotovoltaik pada tugas akhir ini.

### 3.3 Perancangan MPPT

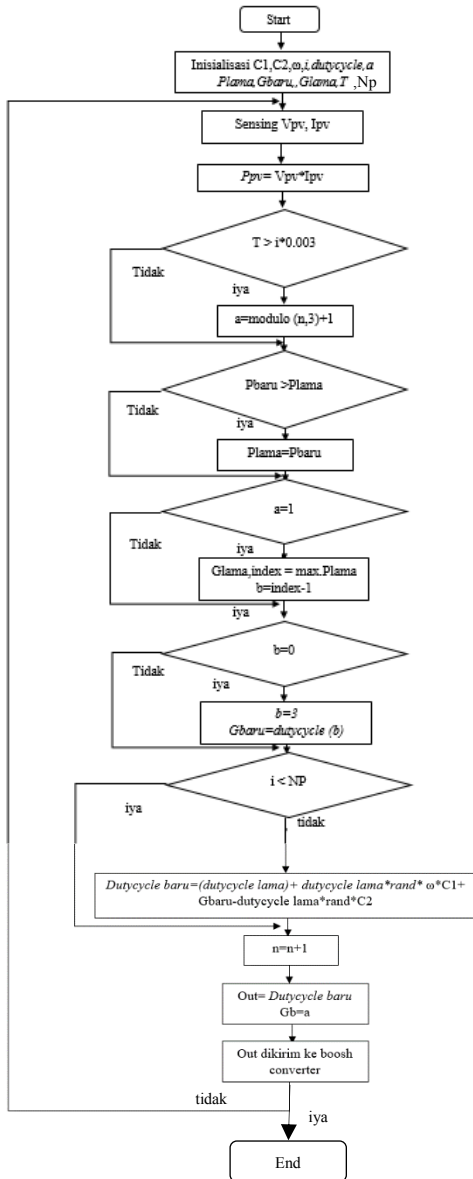
Perancangan MPPT pada tugas akhir ini digunakan untuk mengatur saklar *boost converter*. *Boost converter* memiliki *input* berupa tegangan dan arus yang dihasilkan dari *output* dari *Photovoltaic array*. Sehingga *boost converter* menghasilkan *output* daya maksimal dengan menggunakan metode *Poticle Swarm Optimization*.

#### 3.3.1 *Particle Swarm Optimization*

*Particle Swarm Optimization* adalah metode yang digunakan untuk tuning *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Hasil olahan PSO berupa *duty cycle* yang digunakan untuk membuka kaki gate pada MOSFET. Fungsi objektif yang digunakan adalah daya ( $P$ ) yang berasal dari perkalian antara arus ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ )  $P = I \cdot V$ . Untuk mendapatkan urutan proses dari *Particle Swarm Optimization* yang diimplementasikan ke dalam MPPT maka diperlukan flowchart. Flowchart *Particle Swarm*

*Optimization* ditunjukkan pada Gambar 3.29. Pada Gambar tersebut saat inisialisasi terdapat parameter yang harus ditentukan yaitu Inersia ( $\omega$ ), *Cognitive learning factor* ( $C_1$ ), *Social learning factor* ( $C_2$ ). Beberapa parameter tersebut terdapat pada Tabel 3.4. Populasi *swarm* yang digunakan berjumlah 3 buah karena jumlah tersebut dianggap cukup untuk melakukan pencarian nilai daya maksimum pada *Photovoltaic array*. Proses selanjutnya evaluasi fitness adalah mendapatkan daya *Photovoltaic* dengan mengalikan arus dan tegangan. Setelah itu melakukan proses pemilihan posisi terbaik. Pada proses ini dilakukan pemilihan *swarm* terbaik dari tiga buah *swarm* yang dipilih. Setelah mendapatkan *swarm* terbaik maka *swarm* tersebut diubah ke *dutycycle*. Step selanjutnya *update* populasi yaitu proses rumus PSO yang dimasukkan dalam mencari *dutycycle* sesuai yang terdapat pada Gambar 3.29. Setelah mendapatkan *dutycycle* terbaik dikirim ke gate MOSFET pada *boosh converter*. Proses ini berlangsung terus menerus sampai simulasi berhenti.

Kelebihan dari Metode *Particle swarm optimization* yang diimplementasikan pada MPPT adalah: PSO dalam mencari nilai *dutycycle* diawali dengan nilai random, sehingga inisialisasi tidak tetap berdasarkan nilai tertentu, tapi bisa disesuaikan dengan sistem MPPT yang digunakan. Kelebihan yang kedua yaitu dalam mencari nilai daya maksimum *update duty cycle* dilakukan dengan berkala, kelebihan yang ketigamengurangi osilasi pada saat *strady state* dalam mencari nilai MPP sehingga daya tracking dengan menggunakan algoritma PSO memiliki *ripple* yang kecil [7]. Kelebihan keempat yaitu membutuhkan inisialisasi parameter sehingga inisialisasi dapat disesuaikan dengan sistem MPPT yang terdapat pada Fotovoltaik. Kelebihan yang kelima memiliki kecepatan konvergensi yang tinggi sehingga dalam mencapai titik optimisasi tidak membutuhkan waktu yang relative lama. Kelebihan yang keenam yaitu rendah tingkat kompleksitas dalam pemrograman sehingga dalam eksekusi program yang mengalami literasi atau pengulangan membutuhkan waktu yang cepat. Tingkat sensitifitas yang tinggi sehingga memudahkan kemampuan untuk mentracking nilai daya maksimum. Kelebihan yang ketujuh yaitu PSO mampu melakukan tracking sehingga didapatkan efisiensi daya pada kondisi irradian tidak seragam (*non-uniform*) [16].



**Gambar 3. 29** Flowchart *Particle Swarm Optimization*

Algoritma *PSO* yang digunakan pada penelitian ini memiliki beberapa parameter ditunjukkan pada table 3.5 berikut.

**Tabel 3. 4** Parameter *Particle Swarm Optimization*

Parameter	Nilai
Populasi swarm	3
Jumlah dimensi	1
Inersia ( $\omega$ )	1.3
Coeffisien percepatan ( $C_1$ )	0.6
Coeffisien percepatan ( $C_2$ )	0.8

Semua nilai dari parameter-parameter *Particle Swarm Optimization* di atas didapatkan dari penelitian sebelumnya [7].

### 3.3.2 Skenario Kondisi

Pada tugas akhir ini pemodelan *Photovoltaic array* terdiri dari beberapa string modul yang parallel. Jumlah banyak puncak pada saat keadaan *partially shaded* tergantung pada jumlah string yang diparalel dan beberapa modul string yang terbayang. Semakin banyak string yang diparalel maka jumlah daya yang dihasilkan juga semakin besar dan semakin bervariasi jumlah modul pv yang terbayang maka jumlah puncak lokal juga semakin banyak.

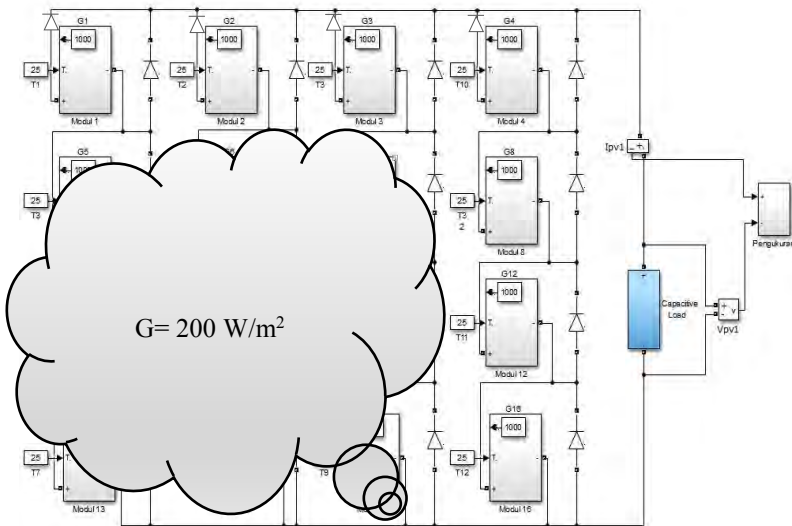
Pada penelitian ini pemodelan *Photovoltaic array* terdiri dari 16 buah Fotovoltaik modul yang membentuk array Pv 4x4 dengan empat buah *string*. Dalam satu *photovoltaic array* terdiri dari beberapa *string Photovoltaic*. Dan dalam satu *string* terdiri dari beberapa modul. Pada satu string ada beberapa modul yang mengalami *partially shaded* guna menghasilkan nilai MPP yang bervariasi dan beberapa puncak lokal yang berbeda-beda. Untuk menganalisa kondisi nilai MPP akan terdapat empat kondisi skenario dengan masing-masing skenario membandingkan pelacakan nilai MPP menggunakan P&O dan PSO.

Pelacakan nilai MPP menggunakan P&O dan PSO terjadi pada beberapa kondisi Fotovoltaik yang berganti-ganti sesuai dengan urutan waktu. Secara garis besar kondisi Fotovoltaik terjadi pada tiga kelompok yaitu pertama Fotovoltaik dalam keadaan normal. Keadaan normal Fotovoltaik mendapat nilai irradiant atau penyinaran matahari yang sama pada semua panel surya. Keadaan yang kedua yaitu Fotovoltaik mengalami perubahan irradiant. Perubahan irradiant merupakan

berubahnya nilai irradiant dari nilai sebelumnya. Keadaan ketiga adalah Fotovoltaik terbayang sebagian (PSC).PSC adalah sebagian modul Fotovoltaik mengalami perubahan nilai irradiant. PSC terjadi karena modul Fotovoltaik tertutupi oleh mendung atau pepohonan sehingga radiasi matahari tidak sepenuhnya menyinari modul Fotovoltaik.

### 3.3.2.1 Skenario pertama *Photovoltaic array* (Normal-PSC)

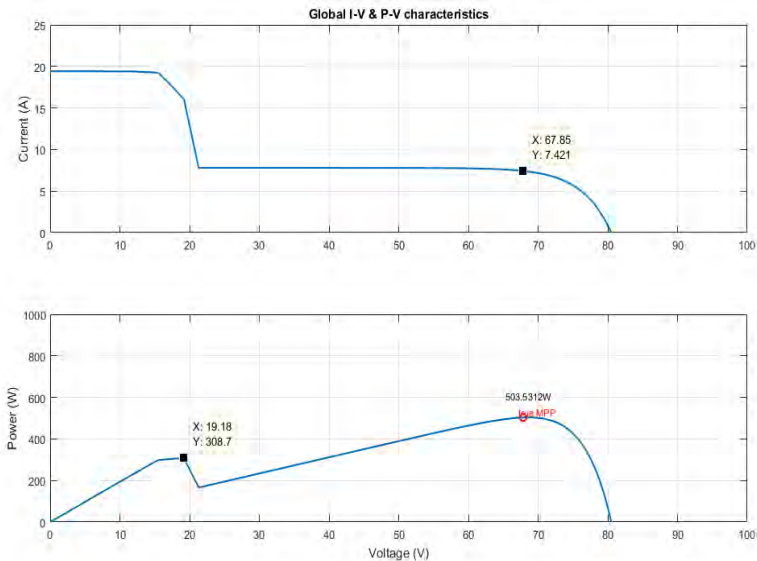
Pada skenario pertama *Photovoltaic array* mengalami dua kali berubah keadaan. Pada keadaan pertama semua string mendapatkan intensitas cahaya sebesar  $1000 \text{ W/m}^2$ . Keadaan ini terjadi selama 0.3 detik. Pada keadaan kedua sebagian modul Fotovoltaik mengalami PSC. PSC terjadi pada modul ke 5,6,7,9,10,11,13,14, dan 15 sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.31. PSC terjadi dari detik 0.3 sampai detik ke 0, 6.



**Gambar 3. 31** *Photovoltaic array* PSC pada skenario pertama

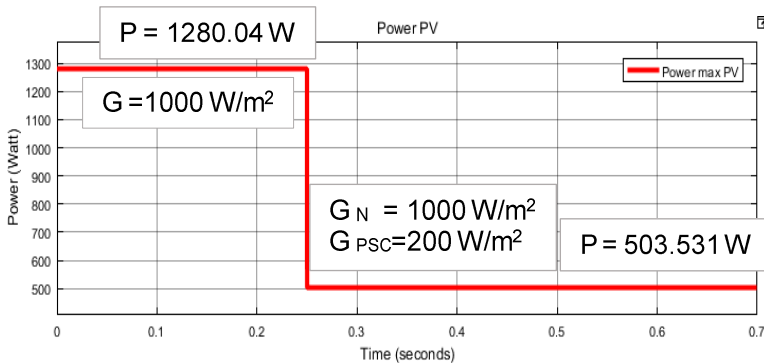
Pada Gambar 3.31 modul yang terbayang sebesar 80% mendapat penyinaran dengan irradiant sebesar  $200 \text{ W/m}^2$ . Sedangkan modul yang lain mengalami penyinaran dengan irradiant  $1000 \text{ W/m}^2$ . Jika pada keadaan terbayang dilakukan pengukuran karakteristik pada *Photovoltaic*

*array* didapatkan daya puncak sebesar 503.53 Watt. Sedangkan puncak daya lokal adalah 308,7 Watt Sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.32. Kurva karakteristik tersebut dilakukan untuk membandingkan ketika algoritma PSO dan algoritma P&O saat mentracking daya pada kondisi PSC. Pada keadaan PSC apakankah terjebak pada Puncak daya lokal atau mampu mentracking daya MPP. Grafik pada Gambar 3.2 didapatkan dari percobaan beban berupa kapasitor *load* yang pertama - tama kapasitor mengalami arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ), setelah itu bertahan mengalami pengisian sampai kapasitor mengalami teggangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ) sehingga didapatkan grafik tegangan – arus dan grafik tegangan – daya.



**Gambar 3. 32** Kurva kharakteristik *Photovoltaic array* pada PSC skenario pertama

Karakteristik daya maksimal Fotovoltaik pada kondisi pertama jika digambarkan berdasarkan urutan waktu ditunjukkan pada Gambar 3.33. Pada Gambar tersebut keadaan irradiant yang mengenai *array Photovoltaic* mengalami dua kali perubahan. Pertama *array Photovoltaic* mengalami irradiant normal dan setelah itu mengalami PSC.



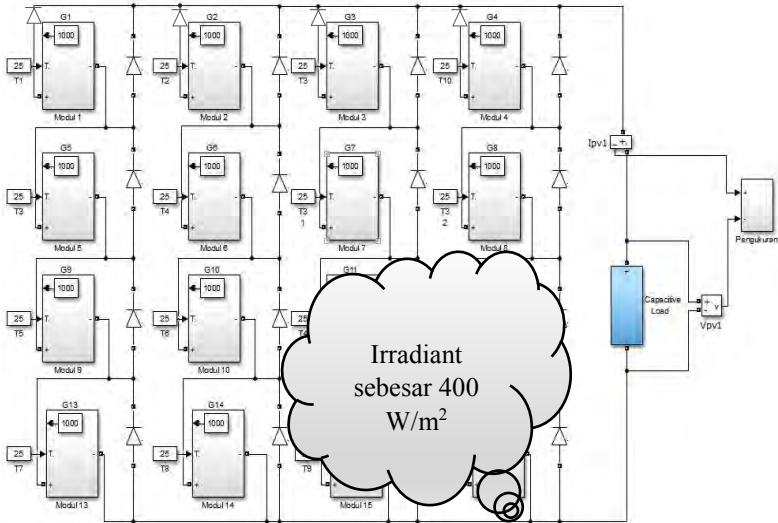
**Gambar 3. 33** Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu

Pada Gambar 3.33 ditunjukkan *array Photovoltaic* kondisi normal dengan irradiant  $1000 \text{ W/m}^2$  terjadi selama 0.25 detik dengan daya sebesar 1280,04 Watt. Dilanjutkan pada kondisi kedua mengalami PSC selama 0.35 detik dengan daya puncak sebesar 503.53 Watt. Pada skenario pertama dilakukan dua kali perubahan keadaan irradiant bertujuan untuk mengetahui hasil tracking MPPT algoritma PSO yang akan dibandingkan dengan teknik P&O .

### 3.3.2.2 Skenario kedua *Photovoltaic array* (N-G-PSC)

Pada skenario kedua bertujuan untuk melihat kemampuan tracking algoritma PSO dan P&O apabila mengalami perubahan irradiant secara bertahap sebanyak tiga kali dari keadaan normal- irradiant berubah –dan diakhiri dengan keadaan terbayang (PSC) .Pada keadaan pertama adalah keadaan normal yaitu semua string mendapatkan intensitas cahaya sebesar  $800 \text{ W/m}^2$ . Keadaan ini terjadi selama 0.3 detik. Pada keadaan kedua *Photovoltaic array* mengalami penurunan intensitas cahaya matahari pada semua modul Fotovoltaik. Intensitas cahaya matahari yang semula  $800 \text{ W/m}^2$  berkurang mejadi  $600 \text{ W/m}^2$ . Keadaan kedua terjadi pada detik ke 0,3 sampai detik ke 0,6. Pada keadaan ketiga array Fotovoltaik mengalami PSC yang dialami pada modul 11,12,15, dan 16 selama 0,3 detik yaitu detik ke 0,6 sampai detik ke 0,8. Modul Fotovoltaik yang mengalami PSC ditunjukkan pada Gambar 3.34.

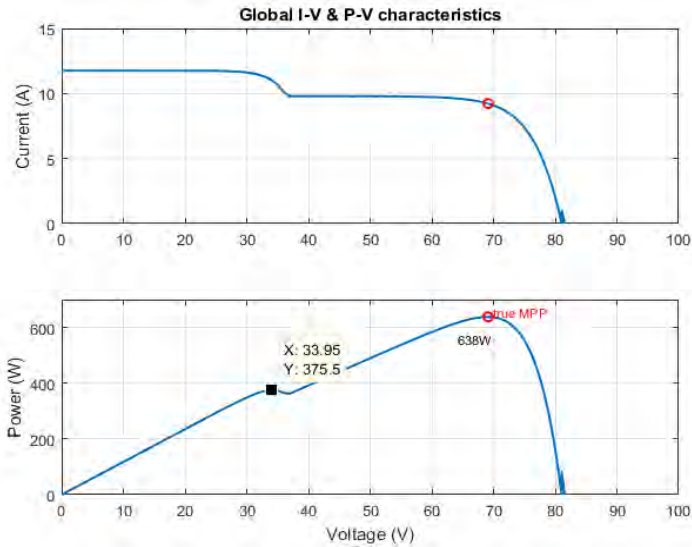




**Gambar 3. 34** Photovoltaic array PSC pada skenario kedua

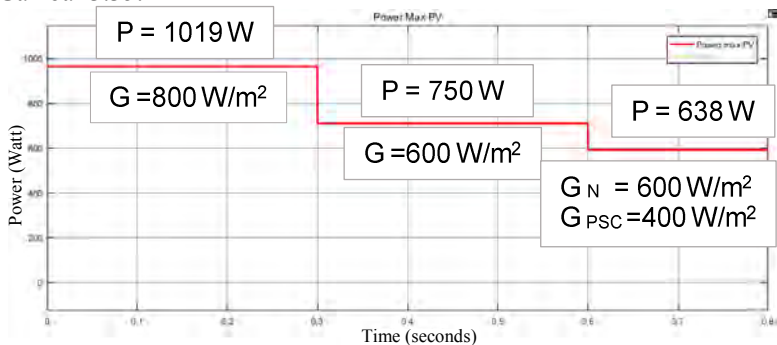
Pada Gambar 3.34 modul yang terbayang sebesar 60% mendapat penyinaran dengan irradian sebesar  $400 \text{ W/m}^2$  dengan modul yang mengalami terbayang adalah modul 11,12,15, dan modul 16 . Sedangkan modul yang lain mengalami penyinaran dengan irradian sebesar  $800 \text{ W/m}^2$ . Jika pada keadaan terbayang dilakukan pengukuran karakteristik pv dengan beban berupa kapasitor *load* didapatkan daya puncak sebesar 638 Watt. Sedangkan puncak daya lokal adalah 375,5 Watt sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.35.

Proses terbentuknya grafik tegangan arus (V-I) dan tegangan daya ( V-P) didapatkan dari percobaan pengukuran array menggunakan beban berupa kapasitor *load* yang ditunjukkan pada Gambar 3.34. Beban tersebut pada awalnya sebelum dialiri listrik mengalami arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ), setelah itu mengalami pengisian bertahap sampai kapasitor mengalami *full charger* terjadi tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ) sehingga didapatkan grafik tegangan – arus dan grafik tegangan sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.35. Pada grafik karakteristik V-I dan V-P terdapat dua buah puncak dengan satu buah puncak daya maksimal. Terbentuknya dua puncak tersebut pengaruh dari *bypass dioda*



**Gambar 3. 35** Kurva kharakteristik *Photovoltaic array* pada PSC skenario kedua

Karakteristik daya maksimal keluaran Fotovoltaik pada skenario kedua jika digambarkan berdasarkan urutan waktu ditunjukkan pada Gambar 3.35.

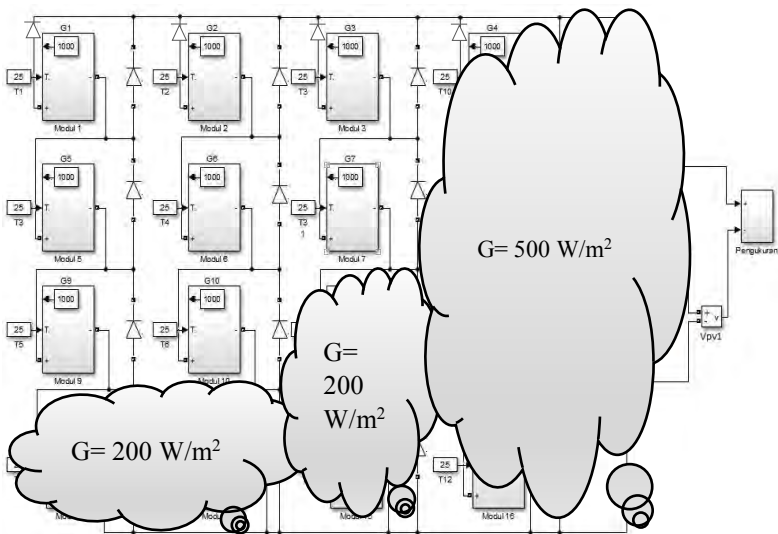


**Gambar 3. 36** Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu

Pada Gambar 3.33 ditunjukkan simulasi dilakukan selama 0,8 detik. Perubahan kondisi terjadi selama 0,3 detik sekali. Pada kondisi pertama array Fotovoltaik kondisi normal dengan irradiant  $800 \text{ W/m}^2$  terjadi selama 0.3 detik dengan daya sebesar 1019 Watt. Dilanjutkan pada kondisi kedua mengalami perubahan radiasi dengan irradiant sebesar  $600 \text{ W/m}^2$ . Pada kondisi kedua daya yang dihasilkan sebesar 750 Watt selama 0,3 detik dari detik ke 0,3 sampai detik ke 0,6. Setelah detik ke 0,6 array Fotovoltaik mengalami PSC dengan daya maksimal 638 Watt. PSC terjadi sampai detik ke 0,8.

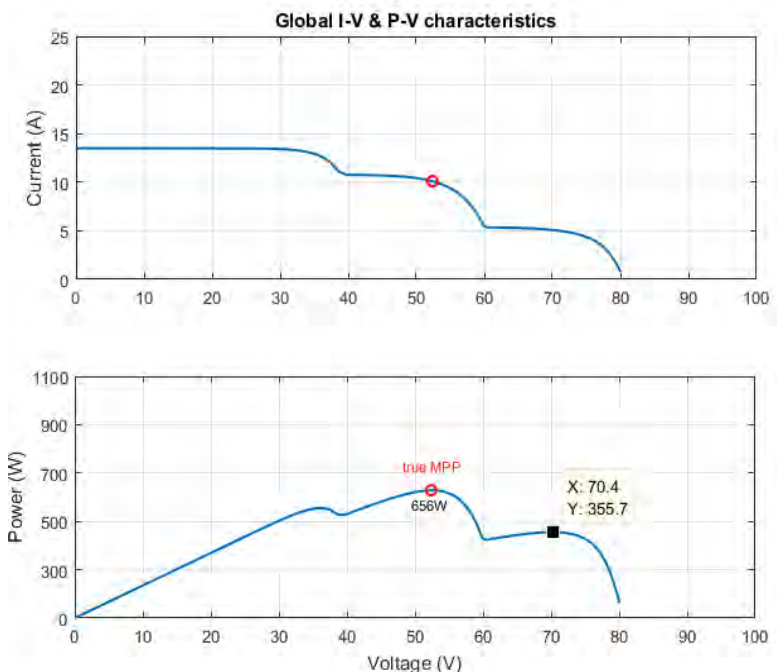
### 3.3.2.3 Skenario ketiga *Photovoltaic array* (PSC-N-G.berubah)

Pada skenario ketiga array Fotovoltaik mengalami tiga kali berubah keadaan. Pada keadaan pertama array Fotovoltaik mengalami PSC dengan tiga Irradiant yang berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 3.36. Irradiant pertama sebesar  $200 \text{ W/m}^2$  terjadi pada modul Fotovoltaik 10,13,14, dan 15. Irradiant kedua sebesar  $500 \text{ W/m}^2$  terjadi pada seluruh string ketiga yaitu modul 4,8,12, dan 16. Sedangkan Irradiant ketiga sebesar  $750 \text{ W/m}^2$  terjadi pada modul 3,dan modul 7. Keadaan ini terjadi selama 0.3 detik.



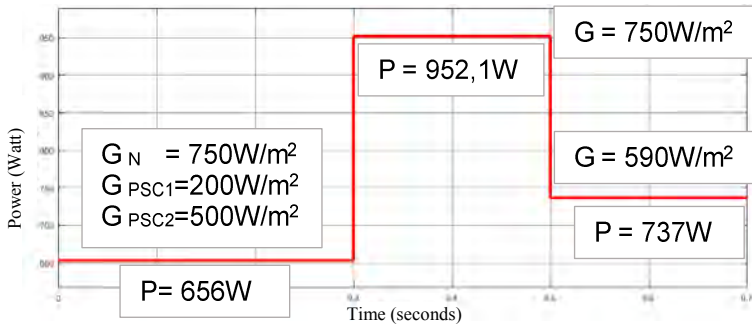
**Gambar 3. 37** *Photovoltaic array* PSC pada skenario ketiga

Pada keadaan PSC yang ditunjukkan pada Gambar 3.34 Fotovoltaik array memiliki karakteristik yang ditunjukkan pada Gambar 3.37. Daya Puncak maksimal sebesar 650 Watt sedangkan daya Puncak lokal adalah 356 Watt.



**Gambar 3. 38** Kurva kharakteristik *Photovoltaic array* pada PSC skenario ketiga

Pada keadaan kedua semua modul Fotovoltaik mengalami penyinaran secara normal dengan irradian sebesar  $750 \text{ W/m}^2$ . Keadaan kedua terjadi pada detik ke 0,3 sampai detik ke 0,5. Pada keadaan ketiga array Fotovoltaik terjadi perubahan penyinaran dengan irradian sebesar  $590 \text{ W/m}^2$  yang diterima oleh semua modul Fotovoltaik dari detik ke 0,5 sampai detik ke 0,7. Jika Karakteristik daya maksimal keluaran Fotovoltaik pada skenario ketiga digambarkan berdasarkan urutan waktu ditunjukkan pada Gambar 3.38.



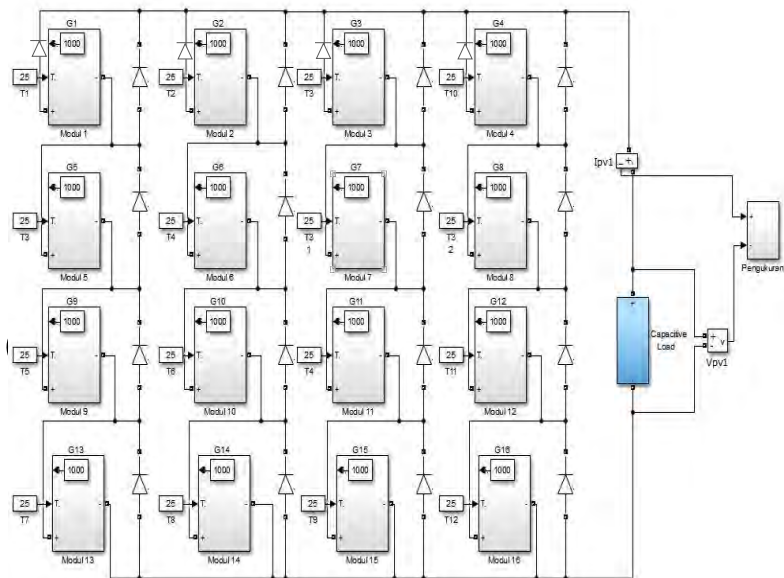
**Gambar 3. 39** Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu

Pada Gambar 3.38 ditunjukkan simulasi dilakukan selama 0,7 detik. Pada kondisi pertama *array* Fotovoltaik kondisi terbayang terjadi selama 0.3 detik dengan daya maksimal sebesar 650 Watt. Dilanjutkan pada kondisi kedua kondisi normal dibarengi dengan perubahan radiasi dengan irradian sebesar 750 W/m<sup>2</sup>. Pada kondisi kedua daya yang dihasilkan sebesar 952,1 Watt selama 0,2 detik dari detik ke 0,3 sampai detik ke 0,2. Setelah detik ke 0,5 *array* Fotovoltaik mengalami perubahan radiasi dengan daya maksimal 737 Watt dengan irradian 590 W/m<sup>2</sup>.

### 3.3.2.4 Skenario keempat *Photovoltaic array* (N-PSC –G.berubah)

Pada skenario keempat *array Photovoltaic* mengalami tiga kali perubahan keadaan. Pada keadaan pertama *array* Fotovoltaik mengalami penyinaran secara merata dengan irradian sebesar 900 W/m<sup>2</sup>. Pada keadaan kedua *array* Fotovoltaik mengalami PSC pada delapan modul yang berbeda yaitu dari modul 9 sampai modul 16 dengan irradian sebesar 300 W/m<sup>2</sup>. PSC pada urutan keadan ke dua ditunjukkan pada Gambar 3.37. Keadaan ketiga *array* Fotovoltaik tetap mengalami PSC dan dibarengi mengalami perubahan penyinaran dengan irradian sebesar 750 W/m<sup>2</sup>.

Tujuan dari skenario keempat ini adalah untuk mengetahui pengaruh *array Photovoltaic* dalam keadaan PSC dengan dibarengi perubahan *irradian*. Pada pengujian tersebut dilakukan untuk melihat perubahan irradian tersebut berpengaruh besar terhadap jumlah daya maksimal yang disalurkan ke sistem dengan menggunakan MPPT algoritma PSO dan P&O.

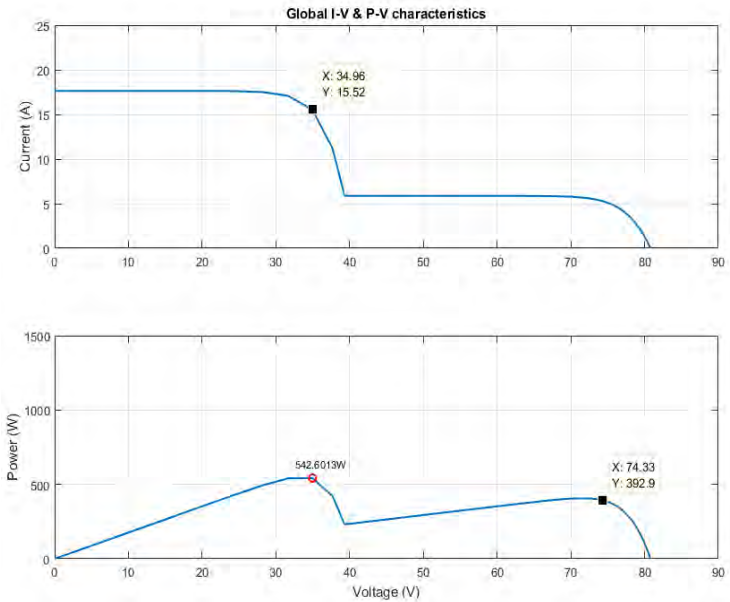


**Gambar 3. 40** Photovoltaic array PSC pada skenario keempat

Pada keadaan PSC yang ditunjukkan pada Gambar 3.39 array Photovoltaic mengalami PSC setengah dari jumlah modul Fotovoltaik yang ada pada array system. Dengan keadaan tersebut array Photovoltaic memiliki karakteristik yang ditunjukkan pada Gambar 3.38. Daya Puncak maksimal sebesar 542.6013 Watt sedangkan daya Puncak lokal adalah 392.7 Watt. Pada Gambar 3.40 tersebut ditunjukkan untuk mengetahui apakah algoritma PSO mampu mentracking daya maksimal sebesar 542.6013 Watt yang dibandingkan dengan algoritma P&O.

Pada skenario keempat ini dengan membandingkan antara algoritma PSO dan P&O pada keadaan PSC diharapkan diantara kedua algoritma tersebut memiliki kelebihan untuk mampu melacak dengan baik dan mampu melacak sampai daya maksimal sesuai kurva karakteristik yang terdapat pada gambar 3.40. Pada Gambar 3.40 selisih antara puncak daya lokal dan puncak daya maksimal tidak terlalu jauh dengan nilai 149,9013 Watt. Sehingga dengan selisih daya yang tidak

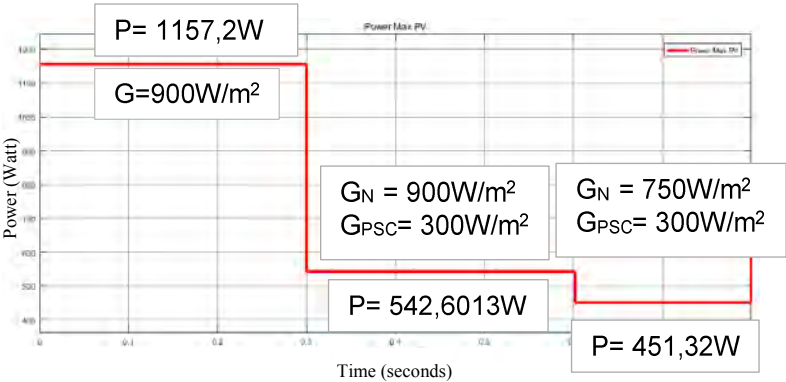
terlalu jauh dapat digunakan untuk pengujian apakah MPPT dengan algoritma PSO mampu melacak daya maksimal dengan baik atau terjebak dalam puncak daya lokal.



**Gambar 3. 41** Kurva karakteristik *Photovoltaic array* PSC pada skenario keempat

Karakteristik daya maksimal keluaran Fotovoltaik pada skenario keempat jika digambarkan berdasarkan urutan waktu ditunjukkan pada Gambar 3.41. Pada Gambar 3.41 ditunjukkan simulasi dilakukan selama 0,8 detik. Pada kondisi pertama *array Photovoltaic* dalam kondisi normal irradian 900 W/m<sup>2</sup> terjadi selama 0.3 detik dengan daya yang dihasilkan sebesar 1157,2 Watt. Dilanjutkan pada kondisi kedua array Fotovoltaik mengalami PSC selama 0,3 detik dari detik ke 0,3 sampai detik ke 0,6. Daya puncak maksimum dihasilkan adalah 542,6013 Watt. simulasi pada detik ke 0,6 sampai 0,8 array Fotovoltaik mengalami perubahan radiasi

yang semula 900 W/m<sup>2</sup> berganti menjadi 750 W/m<sup>2</sup> dengan daya puncak maksimum yang dihasilkan adalah 451,32 Watt.



**Gambar 3. 42** Kurva Daya maksimum Fotovoltaik berdasarkan urutan waktu



*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

## **BAB IV**

### **HASIL SIMULASI DAN ANALISIS**

Pada Bab 4 ini akan dibahas tentang analisa data dan hasil simulasi terhadap sistem Fotovoltaik yang dilakukan beberapa skenario kondisi.

#### **4.1 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Pertama**

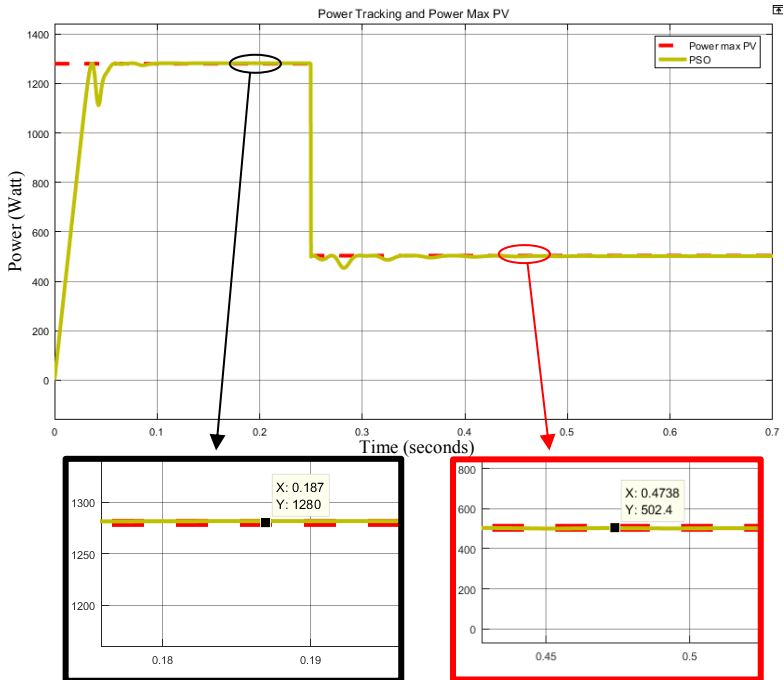
Pada simulasi ini dilakukan pada ukuran array Fotovoltaik ukuran 4x4 dengan suhu lingkungan 25°C merupakan suhu standart tes sebuah Fotovoltaik. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menguji pengaruh perubahan kondisi intensitas matahari yang awalnya normal menjadi terbayang sebagian (PSC). Perubahan keadaan tersebut mempengaruhi daya keluaran dari *array Photovoltaic*.

##### **4.1.1 Simulasi dan Analisis MPPT Skenario Pertama Menggunakan Algoritma PSO**

Kurva daya keluaran array Fotovoltaik kondisi normal dengan irradiant 1000 W/m<sup>2</sup> pada suhu lingkungan 25°C ditunjukkan pada Gambar 3.32. Gambar tersebut memaparkan nilai MPP adalah 1280,04 Watt dengan lama penyinaran selama 0,25 detik. Selama 0,25 detik array Fotovoltaik mengalami penyinaran secara keseluruhan dengan irradiant yang optimal. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kondisi array Fotovoltaik dalam keadaan normal dan suhu *Standart Test Condition* (STC) mampu mendapatkan nilai daya yang maksimal. Setelah detik ke 0,25 modul Fotovoltaik terbayang sebagian sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.30. Dalam keadaan real modul fotovoltaik yang terbayang tersebut dikarenakan awan yang melintas atau bayangan pepohonan sehingga menutupi cahaya matahari yang mengenai permukaan modul Fotovoltaik.

Pada peralihan kondisi dari irradiant normal ke PSC Kurva daya tracking dengan algoritma PSO ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada gambar tersebut menjelaskan bahwa daya tracking yang dilakukan oleh algoritma PSO pada kondisi normal adalah 1280 Watt. Nilai daya tersebut mendekati nilai daya keluaran Fotovoltaik yaitu 1280,04 Watt. Pada kondisi normal waktu yang dibutuhkan algoritma PSO untuk melakukan

konvergensi dan mendapatkan nilai MPP kurang dari 0,1 detik ditunjukkan pada Gambar 4.1



**Gambar 4. 1** Kurva daya tracking algoritma PSO pada skenario pertama

Gambar 4.1 tersebut menjelaskan bahwa pada kondisi PSC algoritma PSO mampu mentracking dan menemukan daya maksimum ( $P_{max}$ ). Nilai daya maksimum yang diperoleh 502,4 Watt dari daya maksimum keluran array Fotovoltaik yang seharusnya 503,53 Watt sesuai nilai yang ditunjukkan pada Gambar 3.29. Sesuai dengan persamaan 3.12 untuk mendapatkan efisiensi tracking maka pada skenario pertama dikondisi normal efisiensi tracking PSO dapat mencapai 99,99%. Sedangkan efisiensi tracking PSO pada kondisi kedua yaitu PSC dapat mencapai 99,77 %. Sehingga pada skenario kondisi pertama ini PSO mampu mentracking dengan performa tracking yang bagus. Efisiensi

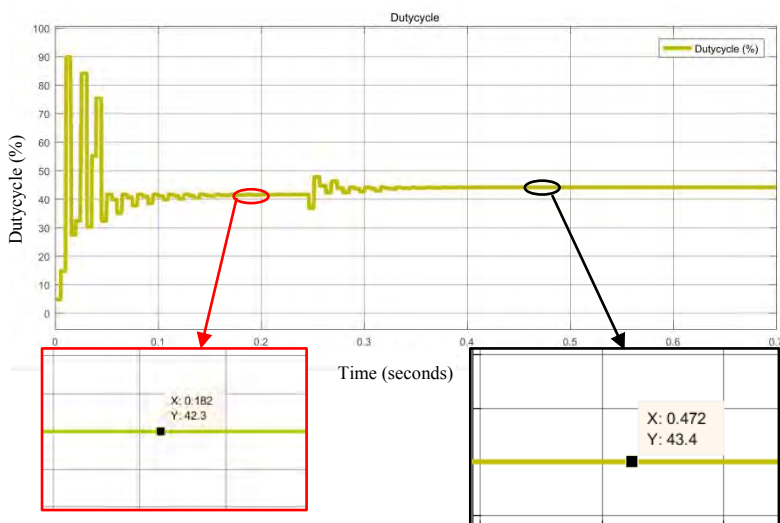
tracking didapatkan berdasarkan persamaan 2.21 maka dilakukan perhitungan sebagai berikut :

Efisiensi Tracking

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi pertama (Normal)} &= \frac{P_{in.Traking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{1280}{1280.04} \times 100\% \\ &= 99.99\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi kedua (PSC)} &= \frac{P_{in.Traking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{502,4}{503,53} \times 100\% \\ &= 99.77\%\end{aligned}$$

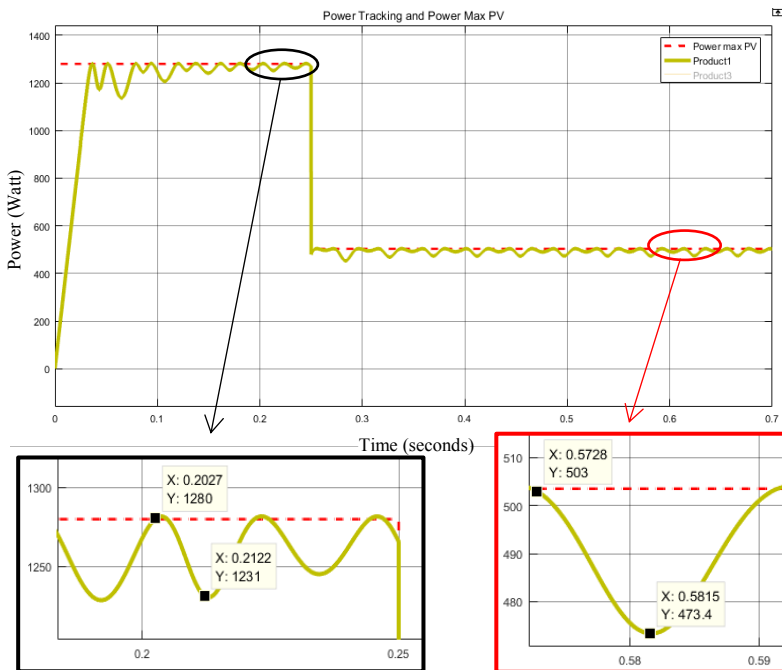
*Dutycycle* PSO pada skenario pertama ini ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada gambar tersebut dijelaskan bahwa kecepatan konvergensi PSO adalah 0,182 detik dan 0,18 detik. Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking bertahap dan mendapatkan nilai *dutycycle* 42,33% dan 43,3% pada waktu konvergensi tersebut.



**Gambar 4. 2** *Dutycycle* algoritma PSO yang dihasilkan oleh sistem MPPT

#### 4.1.2 Simulasi dan Analisis MPPT Skenario Pertama Menggunakan Algoritma P&O

Pada skenario pertama MPPT menggunakan algoritma P&O dilakukan dengan dua kondisi berbeda. Pada kondisi normal array Fotovoltaik dengan irradian 1000 W/m<sup>2</sup> pada suhu lingkungan 25°C memiliki nilai MPP 1280,04 Watt ditunjukkan pada Gambar 3.32. Selama 0,7 detik Array Fotovoltaik mendapatkan dua kali penyinaran yang berbeda. Pada 0,25 detik pertama array Fotovoltaik mengalami penyinaran secara keseluruhan dengan dengan irradian yang optimal. Setelah detik ke 0,25 modul Fotovoltaik terbayang sebagian sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.30. Pengujian sistem MPPT dengan algoritma P&O dilakukan dengan dua urutan kondisi yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4.3



**Gambar 4. 3** Kurva daya tracking algoritma P&O pada skenario pertama

Pada skenario pertama dengan algoritma P&O ditunjukkan pada Gambar 4.3 kurva daya tracking memiliki *ripple* daya. Pada kondisi pertama daya maksimum yang mampu ditracking oleh algoritma P&O adalah 1280 Watt sedangkan daya minimumnya adalah 1231 Watt. Adanya *ripple* daya dikarenakan *dutycyle* saat sudah mencapai konvergen mengalami nilai naik dan turun secara periodik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sehingga mengakibatkan nilai tracking daya juga mengalami naik turun.

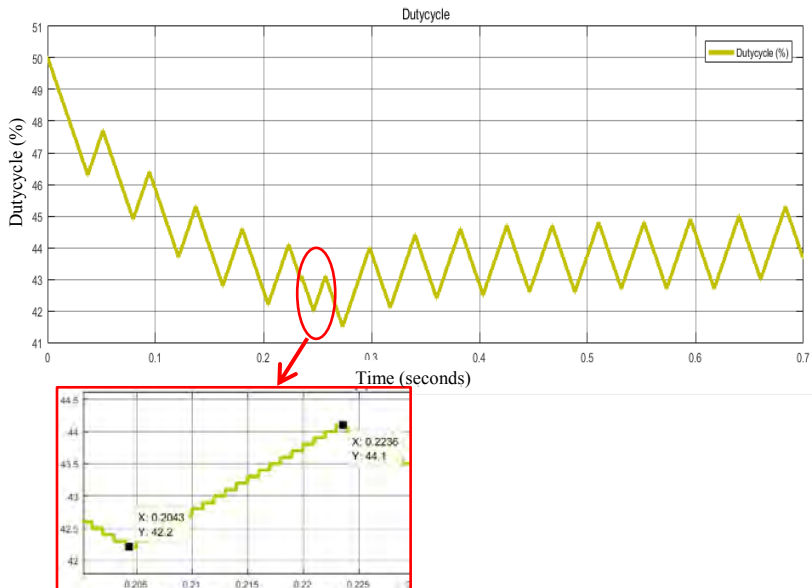
Pada peralihan kondisi dari irradiant normal ke PSC Kurva daya tracking dengan algoritma P&O. Pada Gambar 4.3 menjelaskan bahwa daya tracking yang dilakukan oleh algoritma P&O pada kondisi PSC nilai maksimum adalah 503 Watt dari daya actual Fotovoltaik yaitu 503,53 Watt nilai actual Fotovoltaik tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.28. Sedangkan nilai minimumnya adalah 473,4 Watt. Pengujian MPPT menggunakan P&O Pada skenario pertama saat kondisi PSC memiliki nilai efisiensi tracking yang baik karena P&O tidak terjebak pada puncak daya lokal. Kurva nilai daya maksimum dan puncak daya lokal ditunjukkan pada Gambar 3.23. Pada kondisi normal efisiensi tracking P&O adalah 99,99 %. Sedangkan pada kondisi PSC efisiensi tracking P&O adalah 99,98%. Dengan daya tracking diambil dari daya tracking nilai maksimal. Perhitungan efisiensi berdasarkan persamaan 2.21 yaitu perbandingan daya actual atau daya yang dapat ditracking oleh MPPT dibandingkan dengan daya karakteristik *Photovoltaic* pada keadaan tersebut. Sehingga dengan adanya perbandingan daya tersebut maka kemampuan tracking P&O dapat dilihat kapasitasnya dalam semua beberapa kondisi irradiant yang berbeda. Perhitungan efisiensi P&O pada skenario pertama adalah sebagai berikut :

Efisiensi Tracking

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi pertama (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{1280}{1280.04} \times 100\% \\ &= 99.99\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi kedua (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{503}{503.53} \times 100\% \\ &= 99.98 \%\end{aligned}$$

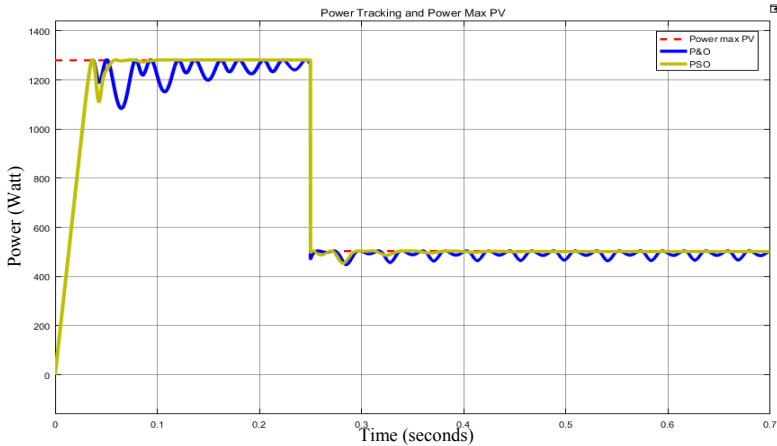
Dutycycle P&O pada skenario pertama kondisi pertama ini ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada gambar tersebut dipaparkan bahwa kecepatan konvergensi P&O adalah 0.1927 detik dan 0,24 detik . Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking bertahap dan mendapatkan nilai dutycycle. Pada kondisi normal nilai dutycycle minimal 42,22% dan dutycycle maksimal adalah 44,1 % dan terbayang dutycycle minimal 42,6% dan dutycycle minimal adalah 44,7%.



**Gambar 4. 4** Dutycycle algoritma P&O yang dihasilkan oleh sistem MPPT

Pada skenario pertama ini antara algoritma PSO dan P&O memiliki beberapa persamaan dan perbedaan dalam proses mentracking daya maksimum pada Fotovoltaik. Kedua algoritma tersebut memiliki persamaan yaitu pada saat PSC tidak terjebak puncak daya lokal sehingga mampu mencapai efisiensi daya tracking yang tinggi. Perbedaan antara PSO dan P&O terletak pada *ripple* daya yang telah mencapai titik konvergensi. PSO memiliki *ripple* daya yang lebih kecil dari P&O. *Ripple* P&O pada Gambar 4.3 sebelumnya dapat mencapai 49W. Hal ini dikarenakan pada saat sudah konvergensi *dutycycle* P&O tidak mampu

mencapai puncak secara tepat sehingga dutycycle mengalami naik turun secara periodik dan berpengaruh pada daya yang ditracking. Perbedaan daya tracking PSO dan P&O dapat dilihat pada Gambar 4.5



**Gambar 4. 5** Kurva daya tracking MPPT PSO dan P&O pada skenario pertama

## 4.2 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Kedua

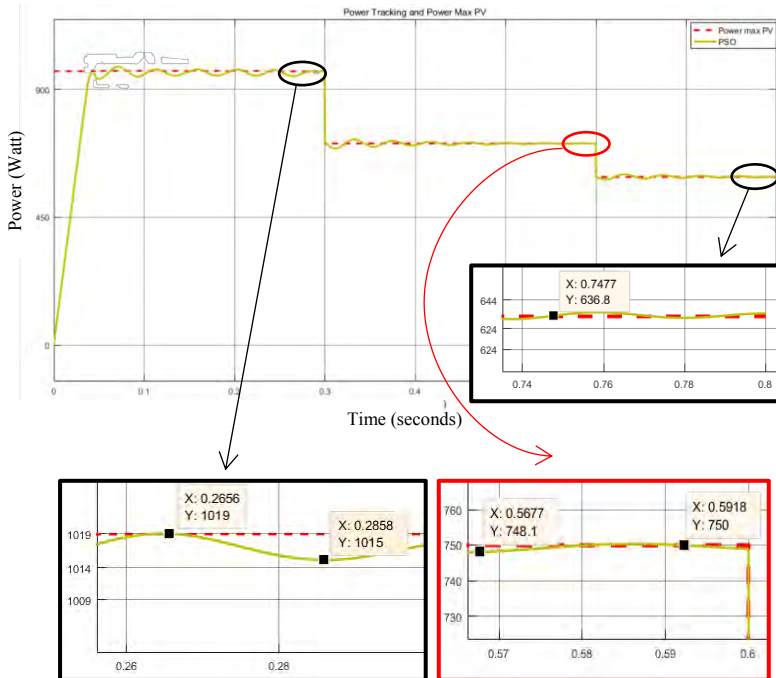
Pada pengujian ini dilakukan pada suhu lingkungan 25°C dengan tiga kali perubahan kondisi irradiant. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan kondisi intensitas cahaya matahari terhadap daya keluaran array Fotovoltaik dengan membandingkan antara algoritma PSO dan P&O.

### 4.2.1 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Kedua dengan PSO

Pada pengujian skenario kedua ini dilakukan dengan tiga kali kondisi perubahan nilai irradiant ditunjukkan pada Gambar 3.35. Pada gambar tersebut dipaparkan hubungan nilai daya maksimal yang dihasilkan dari penyinaran array Fotovoltaik terhadap waktu. Sedangkan Pada Gambar 4.9 memaparkan nilai daya tracking dari algoritma PSO. Pada Gambar tersebut dipaparkan bahwa saat kondisi pertama yaitu selama 0,3 detik nilai daya tracking yang mampu dihasilkan adalah



1019W. Nilai daya tersebut sama dengan nilai daya keluaran array Fotovoltaik. Sedangkan pada kondisi kedua daya tracking yang mampu dihasilkan oleh PSO adalah 750 Watt dengan nilai daya tracking minimalnya adalah 748,1W. Pada kondisi terakhir yaitu PSC dengan daya tracking yang mampu ditracking oleh PSO sebesar 636,8Watt. Selisih 113,2 Watt dari daya tracking saat Fotovoltaik kondisi kedua dengan irradiant 600 W/m<sup>2</sup>.



**Gambar 4. 6** Kurva daya tracking algoritma PSO pada skenario kedua

Sesuai dengan persamaan 2.21 untuk mendapatkan efisiensi tracking pada skenario kedua kondisi normal efisiensi tracking PSO dapat mencapai 100%. Sedangkan efisiensi tracking PSO pada kondisi kedua setelah mengalami perubahan nilai irradiant dapat mencapai 100 %. Pada kondisi terakhir yaitu PSC PSO mampu mentracking dengan efisiensi 99,81% dari daya yang harus ditracking yaitu 638 W. Apabila

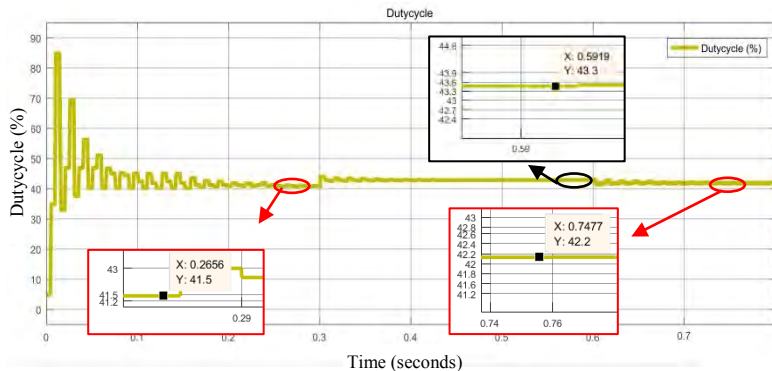
dari ketiga kondisi pada skenario kedua dirata-rata maka performa tracking PSO mencapai 99,94%. Sehingga dapat dikatakan performa tracking PSO pada skenario kedua ini adalah bagus. Efisiensi tracking didapatkan berdasarkan persamaan 2.21 maka dilakukan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi pertama (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{1019}{1019} \times 100\% \\ &= 100\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi kedua} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ \text{(Irradian berubah)} &= \frac{750}{750} \times 100\% \\ &= 100\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi ketiga (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{636,8}{638} \times 100\% \\ &= 99.81\%\end{aligned}$$

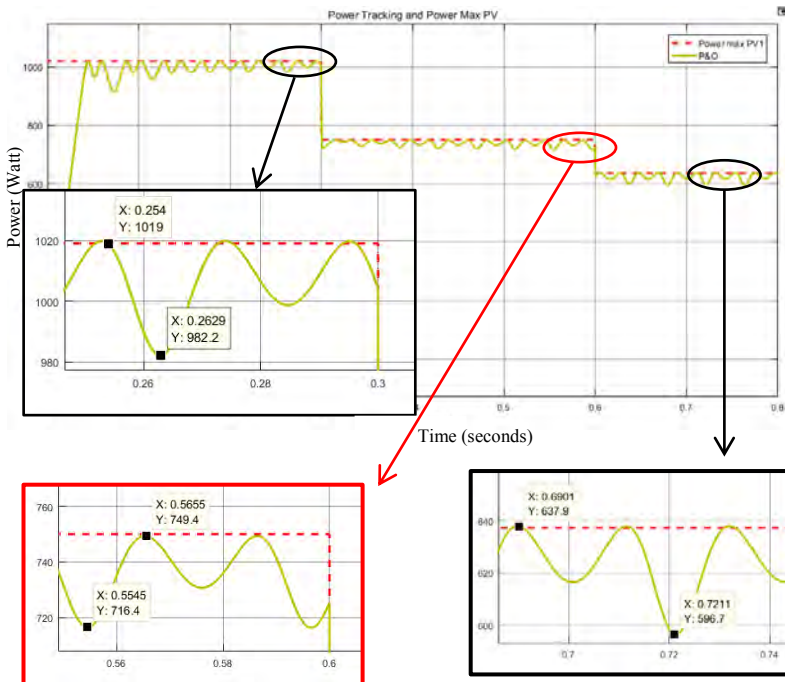
Dutycycle PSO pada skenario kedua kondisi pertama ini ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pada gambar tersebut dipaparkan bahwa kecepatan konvergensi PSO disetiap kondisi berturut- turut adalah 0,25 detik, 0,09 detik, dan 0,091 detik . Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking secara bertahap disetiap kondisi berturut- turut mendapatkan nilai *dutycycle* 41,5%, 43,4%, dan 42,2%.



**Gambar 4. 7** *Dutycycle* algoritma PSO yang dihasilkan oleh sistem MPPT

#### 4.2.2 Simulasi dan Analisa MPPT Pada Skenario Kedua dengan P&O

Pada skenario kedua tracking daya dengan menggunakan algoritma P&O ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada gambar tersebut ditunjukkan daya tracking memiliki *ripple* daya. Pada kondisi pertama daya maksimum yang mampu ditracking oleh algoritma P&O adalah 1019 Watt sedangkan daya minimumnya adalah 982,2 Watt. Daya keluaran array Fotovoltaik yang harus ditracking yaitu 1019 Watt. *Ripple* daya tracking dikarenakan adanya *dutycyle* yang naik turun secara periodik setelah mencapai konvergensi.



**Gambar 4. 8** Kurva daya tracking algoritma P&O pada skenario kedua

Grafik daya tracking P&O pada pengujian kedua ini ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada kondisi kedua yaitu peralihan irradian dari

irradiant 800 W/m<sup>2</sup> ke 600 W/m<sup>2</sup> daya output array Fotovoltaik mengalami penurunan dari 1019 Watt ke 750 Watt. Pada Kondisi tersebut P&O mampu mentracking dan mendeteksi keluaran array Fotovoltaik sebesar 749,4 Watt dengan daya tracking minimum didapatkan 716,4 Watt. Pada kondisi ketiga yaitu array Fotovoltaik mengalami PSC sehingga daya keluaran Fotovoltaik menurun menjadi 638 Watt. Dari daya kondisi PSC tersebut algoritma P&O mampu mentracking dan mendeteksi dengan Daya maksimum sebesar 637,9 Watt. Daya minimumnya sebesar 596,7 Watt.

Efisiensi tracking daya P&O pada pengujian kedua berdasarkan persamaan 2.23 pada kondisi pertama efisiensi daya didapatkan 100% dengan daya tracking diukur dari daya tracking maksimal. Sedangkan pada kondisi kedua yang mengalami perubahan nilai irradiant didapatkan nilai efisiensi daya tracking sebesar untuk mendapatkan efisiensi tracking pada skenario kedua kondisi normal efisiensi tracking P&O dapat mencapai 100%. Sedangkan efisiensi tracking P&O pada kondisi kedua yang telah mengalami perubahan nilai irradiant dapat mencapai efisiensi sebesar 99,92%. Pada kondisi ketiga yang mengalami PSC P&O mampu mentracking dengan efisiensi 99,98%. Apabila pengujian pada skenario kedua ini kemampuan P&O dalam mentracking daya didapatkan nilai 99,97%. Efisiensi tracking didapatkan berdasarkan persamaan 2.21 maka dilakukan perhitungan sebagai berikut :

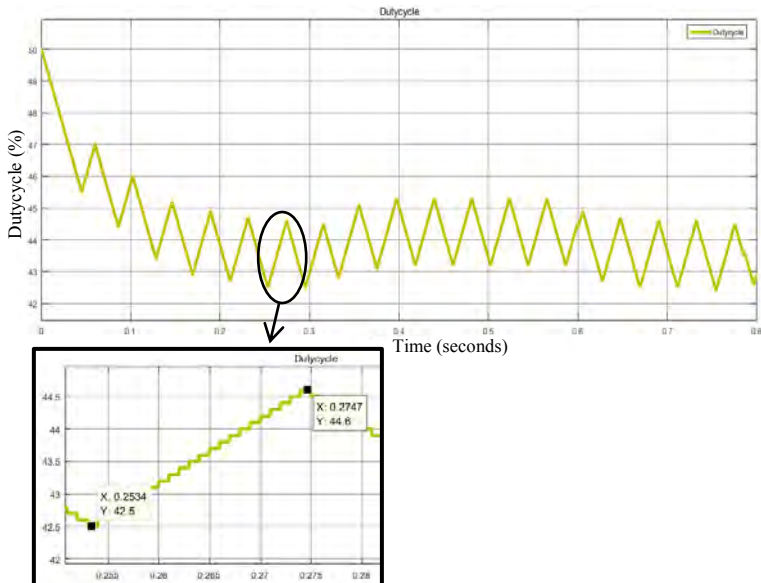
$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi pertama (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{1019}{1019} \times 100\% \\ &= 100 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi kedua} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ \text{(Irradian berubah)} &= \frac{749,4}{750} \times 100\% \\ &= 99,92 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi ketiga (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{637,9}{638} \times 100\% \\ &= 99,98 \%\end{aligned}$$

Pada pengujian skenario kedua ini didapatkan nilai *dutycycle* P&O ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pada gambar tersebut dipaparkan bahwa

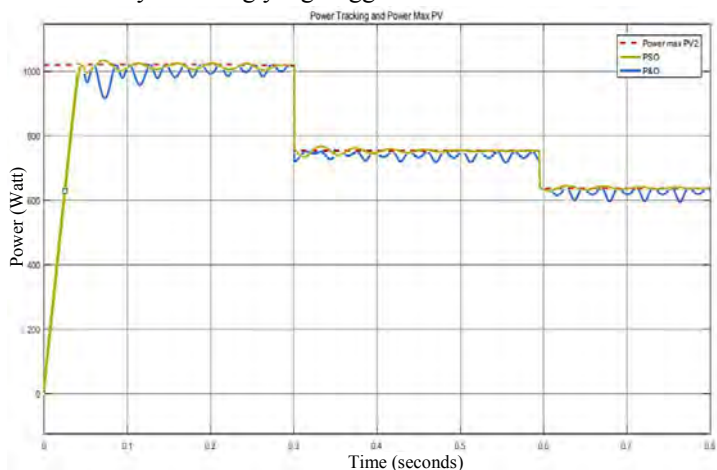
kecepatan konvergensi P&O pada setiap kondisi berturut-turut adalah 0,2534 detik, 0,0976 detik dan 0,09 detik . Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking secara bertahap dan mendapatkan nilai *dutycycle* minimal 42,5% dan *dutycycle* maksimal 44,6% .Kondisi kedua dan tiga mendapatkan *dutycycle* min 42,5% max 44,6% , dan *dutycycle* min 42,5% max 44,6% semua ditunjukkan pada Gambar 4.9.



**Gambar 4. 9** *Dutycycle* algoritma P&O yang dihasilkan oleh sistem MPPT

Pada skenario kedua antara algoritma PSO dan P&O memiliki beberapa persamaan dan perbedaan dalam proses mentracking daya maksimum pada Fotovoltaik. Perbedaan antara PSO dan P&O terletak pada *ripple* daya yang telah mencapai titik konvegensi. PSO memiliki *ripple* daya yang lebih kecil dari pada P&O. *Ripple* P&O pada kondisi pertama dipaparkan pada Gambar 4.13 dapat mencapai 36,8W. Hal ini dikarenakan pada saat sudah konvergensi *dutycycle* P&O tidak mampu mencapai puncak secara tepat sehingga *dutycycle* mengalami naik turun secara periodik dan berpengaruh pada daya yang ditracking. Perbedaan

daya tracking PSO dan P&O dapat dilihat pada Gambar 4.10. Pada skenario kedua ini PSO dan P&O memiliki persamaan yaitu pada saat PSC tidak terjebak puncak daya lokal sehingga mampu mencapai efisiensi daya tracking yang tinggi.



**Gambar 4. 10** Kurva daya tracking MPPT PSO dan P&O pada skenario kedua

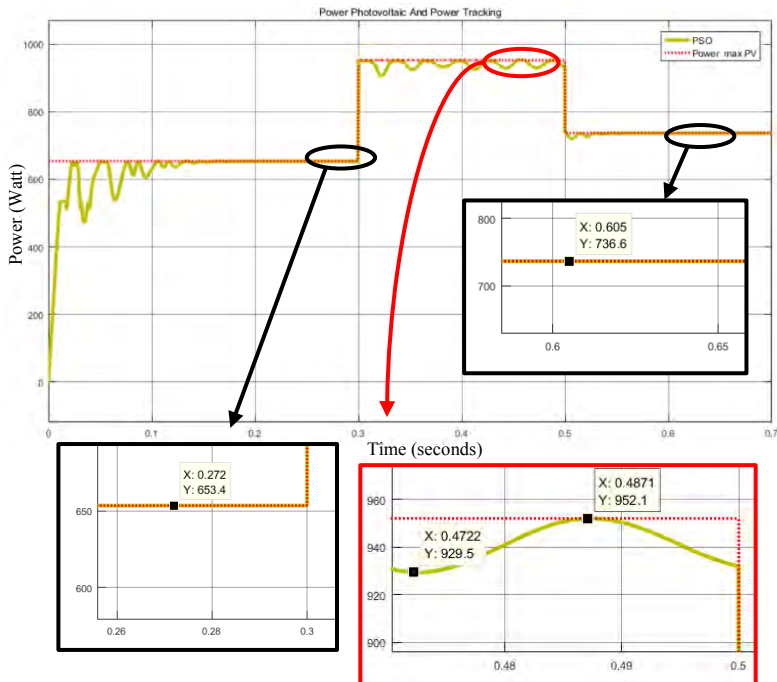
### 4.3 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Ketiga

Pada pengujian ini dilakukan pada suhu lingkungan 25°C yang merupakan suhu standart tes . Pengujian skenario ini dilakukan tiga kali perubahan kondisi intensitas matahari yang mengenai array Fotovoltaik. Pengujian ini dilakukan untuk melihat pengaruh intensitas matahari yang berubah terhadap output daya MPPT

#### 4.3.1 Simulasi dan Analisa MPPT Pada Skenario Ketiga dengan PSO

Pada skenario ketiga ini dilakukan tiga kali perubahan kondisi intensitas matahari diawali dengan PSC selama tiga detik setelah itu irradiant normal dan disusul dengan perubahan nilai irradiant sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 3.38. Pada kondisi pertama dengan mengalami PSC puncak daya maksimal yang dihasilkan (MPP) adalah 656 Watt. Dengan daya tracking yang diperoleh PSO adalah 653,4 Watt. Setelah 0,3 detik setelahnya array Fotovoltaik yang tadinya terbangang sebagian

berubah menjadi normal. Sehingga nilai daya yang dihasilkan oleh Fotovoltaik meningkat menjadi 952,1 Watt. Daya tersebut mampu ditracking oleh PSO dengan nilai daya maksimum 952,1 Watt dan daya minimum sebesar 929,1 Watt. Adanya selisih nilai daya maksimal dan minimal pada kemampuan tracking PSO dikarenakan pada kurun waktu 0,2 detik PSO belum mencapai nilai konvergen sehingga daya yang dihasilkan masih mengalami *ripple*. Setelah detik ke 0,5 irradian matahari mengalami perubahan dari semula 750 W/m<sup>2</sup> menjadi 590 W/m<sup>2</sup> dan menghasilkan nilai tegangan sebesar 737V. Pada kondisi ketiga tersebut PSO dapat mentracking daya sebesar 736,6 Watt. Kemampuan tracking algoritma PSO ditunjukkan pada Gambar 4.11 dibawah ini.



**Gambar 4. 11** Kurva daya tracking algoritma PSO pada skenario ketiga

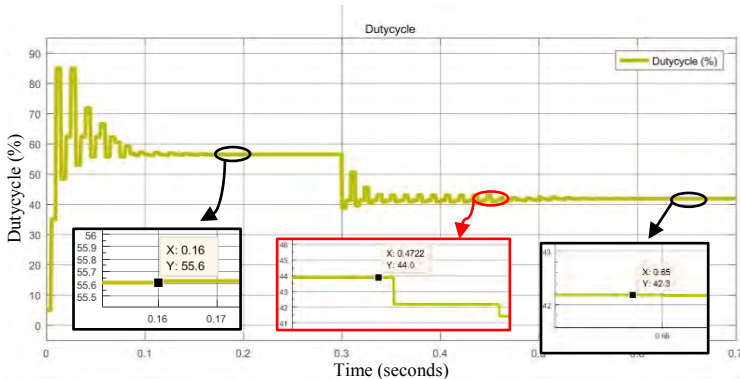
Efisiensi tracking daya PSO pada skenario ketiga berdasarkan persamaan 2.21 didapatkan perkondisi. Pada kondisi pertama yaitu Fotovoltaik mengalami PSC efisiensi daya didapatkan 99,60%. Pada

kondisi selanjutnya yang mengalami perubahan kondisi dari PSC ke normal didapatkan nilai efisiensi daya tracking yang mampu didapatkan PSO adalah 100%. Dan pada kondisi ketiga yang mengalami perubahan nilai irradiant PSO mampu mentracking daya dengan efisiensi sebesar 99,94%. Apabila ketiga keadaan pada skenario ketiga ini dirata-rata maka efisiensi daya yang mampu ditracking PSO adalah 99,85%. Efisiensi tracking didapatkan berdasarkan pada persamaan 2.21 dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi tracking kondisi pertama (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{653,4}{656} \times 100\% \\ &= 99,60 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi tracking kondisi kedua (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{952,1}{952,1} \times 100\% \\ &= 100 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi tracking kondisi ketiga} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ \text{(Irradian berubah)} &= \frac{736,6}{737} \times 100\% \\ &= 99,94 \% \end{aligned}$$



**Gambar 4. 12** Dutycycle algoritma PSO yang dihasilkan oleh sistem MPPT

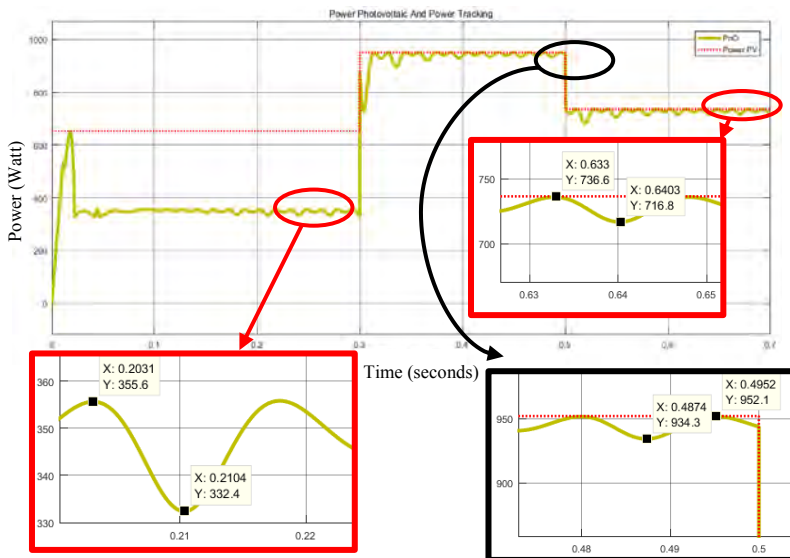
Pada Gambar 4.12 diatas merupakan nilai dutycycle PSO pada Pengujian skenario ketiga ini. Pada gambar tersebut dipaparkan bahwa kecepatan konvergensi PSO berturut-turut adalah 0,1534 detik, 0,172



detik, dan 0,11 detik . Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking secara bertahap mendapatkan nilai dutycycle berturut-turut adalah 55,6%,44,0 % dan 42,3%.

#### 4.3.2 Simulasi dan Analisa MPPT Pada Skenario Ketiga dengan P&O

Hasil simulasi skenario ketiga dengan algoritma P&O ditunjukkan pada Gambar 4.18. Pada Gambar tersebut ditunjukkan bahwa algoritma P&O pada kondisi pertama yaitu array Fotovoltaik mengalami PSC . Saat PSC daya yang dapat ditracking oleh P&O adalah 355,6 Watt dari daya puncak maksimum Fotovoltaik yaitu 656 Watt. Adanya selisih tracking yang besar disebabkan P&O terjebak pada daya lokal maksimal. Sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 dibawah ini.



**Gambar 4. 13** Kurva daya tracking algoritma P&O pada skenario ketiga

Pada kondisi kedua daya tracking yang mampi dideteksi oleh P&O adalah 952,1 Watt dengan daya minimalnya adalah 934,3 Watt. Pada kondisi ketiga yaitu array Fotovoltaik mengamali perubahan irradian

daya tracking yang mampu dideteksi oleh P&O adalah 736,6 Watt dan nilai daya tracking minimum adalah 716,8 Watt dari daya yang keluran Fotovoltaik yang seharusnya ditracking adalah 737 Watt. Daya tracking tersebut nantinya akan disalurkan ke boost converter untuk dinaikkan tegangannya dengan disesiakan dengan tegangan yang dibutuhkan beban sistem yaitu berupa baterai 120 Volt.

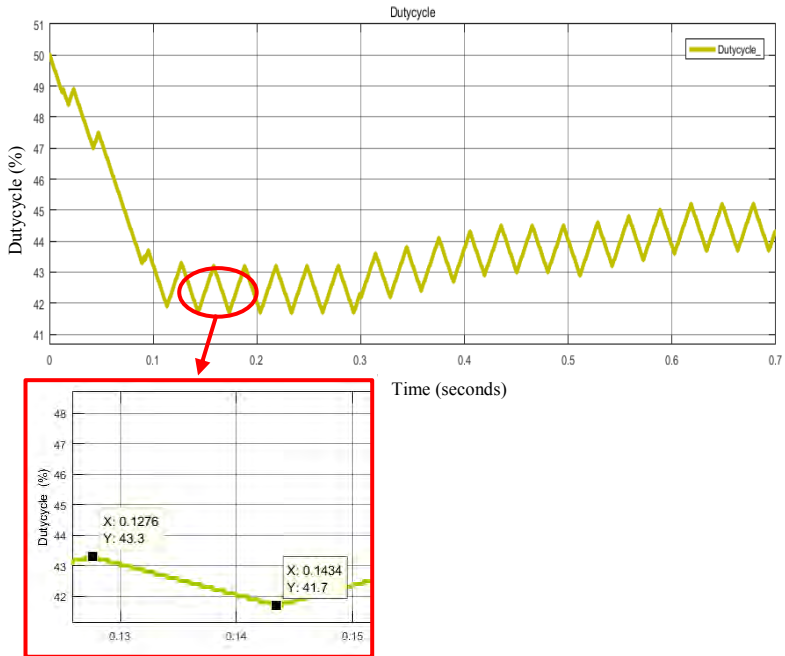
Tracking daya P&O pada pengujian ke tiga ini berdasarkan persamaan 2.21 didapatkan efisiensi daya perkondisi. Pada kondisi pertama efisiensi daya didapatkan 54,20 % dengan daya tracking diukur dari daya tracking maksimal. Pada kondisi pertama P Sedangkan pada kondisi kedua yang mengalami perubahan kondisi dari PSC ke normal didapatkan nilai efisiensi daya tracking dapat mencapai 100%. Pada kondisi ketiga yang mengalami perubahan nilai iradiant P&O mampu mentracking dengan efisiensi 99.94 %. Apabila pengujian pada skenario kedua ini kemampuan P&O dalam mentracking daya didapatkan nilai 84,71%. Efisiensi tracking didapatkan berdasarkan persamaan 2.23 maka dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi tracking kondisi pertama (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{355,6}{656} \times 100\% \\ &= 54,20 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi tracking kondisi kedua (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{952,1}{952,1} \times 100\% \\ &= 100 \% \end{aligned}$$

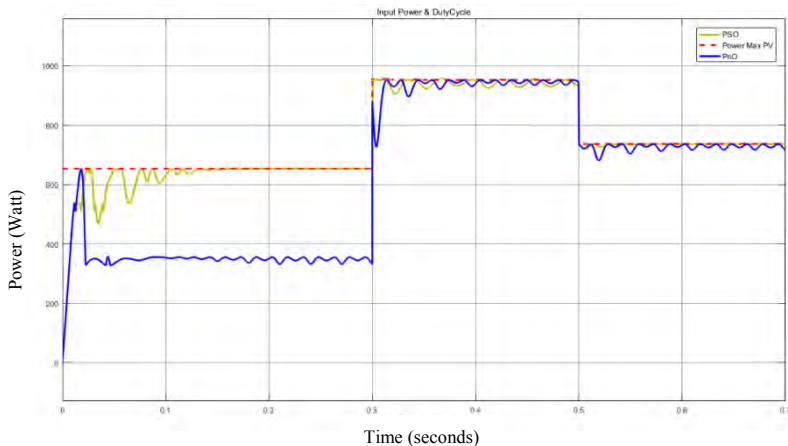
$$\begin{aligned} \text{Efisiensi tracking kondisi ketiga} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ \text{(Irradian berubah)} &= \frac{736,6}{737} \times 100\% \\ &= 99.94 \% \end{aligned}$$

Nilai dutycycle P&O pada Pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 4.14. Pada gambar tersebut dipaparkan bahwa kecepatan konvergensi P&O berturut-turut adalah 0,1534 detik, 0,135 detik ,dan 0,118 detik . Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking secara bertahap dan mendapatkan nilai *dutycycle* berturut –turut *dutycycle* minimal 41,7% maksimal 43,3%, *dutycycle* minimal 43% maksimal 44,5%, dan *dutycycle* minimal 43,7% maksimal 45,2%.



**Gambar 4. 14** *Dutycycle* algoritma P&O yang dihasilkan oleh sistem MPPT

Pada skenario ketiga ini antara algoritma PSO dan P&O memiliki perbedaan dalam proses memtracking daya maksimum pada Fotovoltaik. Perbedaan antara PSO dan P&O terletak saat kondisi pertama yaitu PSC algoritma P&O terjebak dalam puncak daya lokal. Sehingga efisien daya yang dihasilkan tidak maksimal. Jika dilihat pada Gambar 4.15 Algoritma P&O pada detik 0,05 pernah mencapai titik daya maksimal tapi setelah itu tracking daya langsung menurun dan terjebak dipuncak daya lokal. Kekurangan P&O dibandingkan dengan PSO yaitu daya tracking P&O mengalami *ripple* daya. Dikarenakan nilai *dutycycle* telah mencapai titik konvergensi mengalami naik turun secara periodik. Perbedaan Grafik tracking daya antara algoritma PSO dan teknik P&O pada skenario ketiga ini ditunjukkan pada Gambar 4.13 dibawah ini.



**Gambar 4. 15** Kurva daya tracking MPPT PSO dan P&O pada skenario ketiga

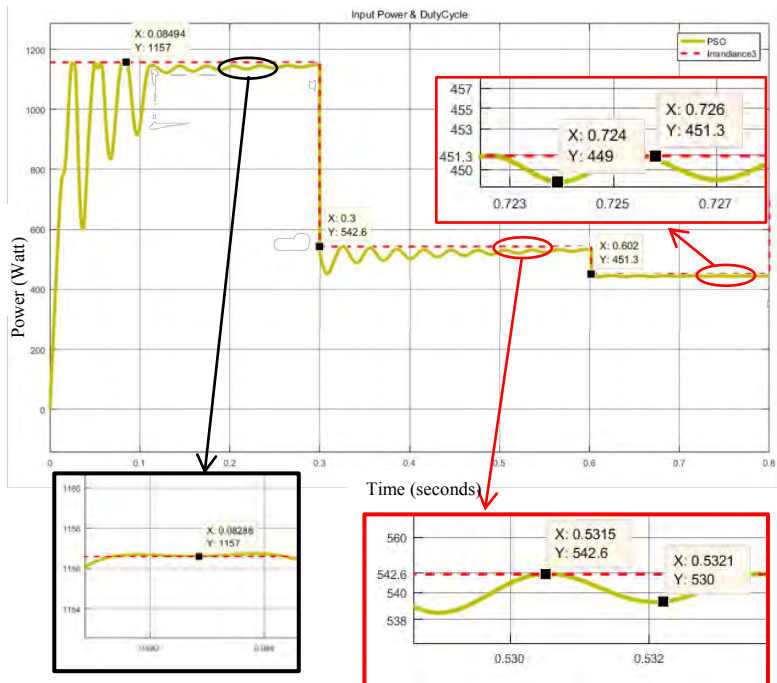
#### 4.4 Simulasi dan Analisis Pada Skenario Keempat

Pada simulasi Skenario keempat ini dilakukan pada suhu lingkungan 25°C dengan tiga kali perubahan penyinaran matahari pada array Fotovoltaik. Tujuan dari pengujian pada skenario ini adalah mendapatkan perbandingan daya tracking yang dihasilkan oleh algoritma PSO dan P&O terhadap pengaruh perubahan intensitas matahari.

##### 4.4.1 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Keempat dengan PSO

Pada Skenario Keempat ini dilakukan pengujian dengan tiga kali kondisi perubahan nilai irradiant ditunjukkan pada Gambar 3.41. Pada gambar tersebut dipaparkan hubungan nilai daya maksimal yang dihasilkan dari penyinaran array Fotovoltaik disetiap kondisi terhadap waktu. Sedangkan Pada Gambar 4.16 memaparkan nilai daya tracking yang mampu didapatkan oleh algoritma PSO. Pada Gambar tersebut dipaparkan bahwa saat kondisi pertama yaitu kondisi normal selama 0,3detik. Nilai daya tracking yang mampu dihasilkan adalah 1157 Watt dari nilai daya keluaran array Fotovoltaik sebesar 1157,2 Watt selisih 0,2 Watt dari nilai daya tracking PSO. Sedangkan pada kondisi kedua yaitu PSC daya tracking yang mampu dihasilkan oleh PSO adalah 542,6 Watt

dengan nilai daya tracking minimalnya adalah 530 Watt. Pada kondisi terakhir yaitu PSC dengan diikuti penurunan nilai irradiant yang semula  $900\text{ W/m}^2$  menjadi  $750\text{ W/m}^2$ . Daya tracking yang mampu dihasilkan oleh PSO sebesar 451,3 Watt dengan daya keluaran Fotovoltaik maksimal adalah 451,32 Watt.



**Gambar 4. 16** Kurva daya tracking algoritma PSO pada skenario keempat

Sesuai dengan persamaan 2.21 untuk mendapatkan efisiensi tracking pada skenario keempat kondisi normal efisiensi tracking PSO dapat mencapai 99,98% dari daya 1157,2 Watt. Sedangkan efisiensi tracking PSO pada kondisi kedua setelah mengalami perubahan PSC dapat mencapai 99,99 % dari daya 542,6013Watt. Pada kondisi terakhir yaitu PSC dan dibarengi dengan perubahan nilai irradiant PSO mampu mentracking dengan efisiensi 99,99% dari daya yang harus ditracking yaitu 451,32Watt. Sehingga dapat dikatakan performa tracking PSO pada

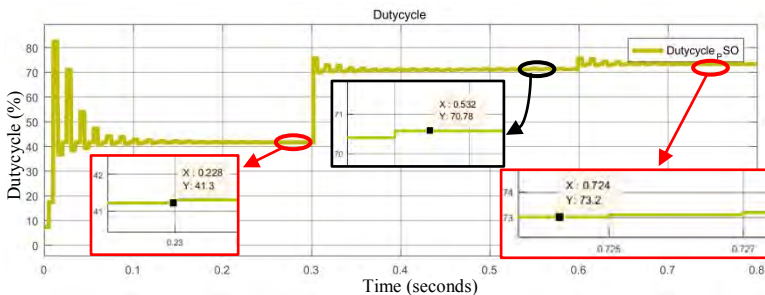
skenario keempat ini dinilai bagus. Efisiensi tracking didapatkan berdasarkan persamaan 2.21 perhitungannya sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi pertama (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{1157}{1157,2} \times 100\% \\ &= 99,98 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi kedua (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{542,6}{542,6013} \times 100\% \\ &= 99,99 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi ketiga} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ \text{(PSC-Irradian berubah)} &= \frac{451,3}{451,32} \times 100\% \\ &= 99,99 \%\end{aligned}$$

Dutycycle PSO ditunjukkan pada Gambar 4.17. Pada gambar tersebut ditunjukkan kecepatan konvergensi PSO berturut- turut adalah 0,22 detik, 0,23 detik dan 0,12 detik. Kecepatan tersebut diperoleh nilai dutycycle berturut-turut 41,3%, 70,78% dan 73,2%.

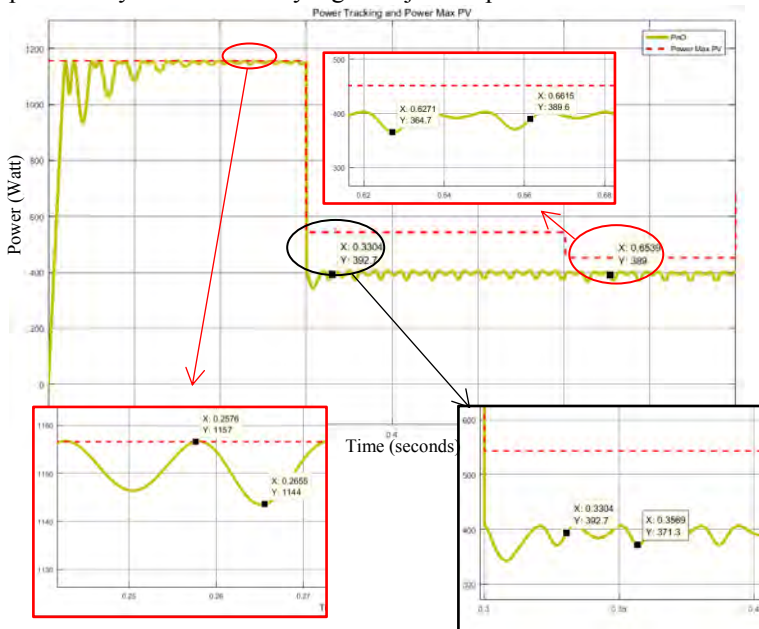


**Gambar 4. 17** Dutycycle algoritma PSO yang dihasilkan oleh sistem MPPT

#### 4.4.2 Simulasi dan Analisis MPPT Pada Skenario Keempat dengan P&O

Pada skenario pengujian MPPT pada skenario keempat menggunakan algoritma P&O dilakukan tiga kali kondisi berbeda. Pada kondisi pertama yaitu array Fotovoltaik pada kondisi normal dengan irradiant 900 W/m<sup>2</sup> pada suhu lingkungan 25°C memiliki nilai MPP 1157,2 Watt ditunjukkan pada Gambar 4.16. Pada kondisi pertama

algoritma P&O mampu mentracking daya 1157 Watt dengan tracking daya minimum adalah 1144 Watt. Setelah detik ke 0,3 pada kondisi kedua modul Fotovoltaik terbangang sebagian daya keluaran array Fotovoltaik 452,32 Watt sedangkan P&O dapat mentracking daya dengan daya puncak 392,7 Watt. Hal ini dikarenakan Algoritma P&O terjebak pada puncak daya lokal. Sesuai yang ditunjukkan pada Gambar 4.18.



**Gambar 4. 18** Kurva daya tracking algoritma P&O pada skenario keempat

Pada Gambar 4.16 ditunjukkan bahwa pada kondisi ketiga yaitu PSC yang dibarengi dengan adanya penyinaran matahari yang berubah. Didapatkan nilai daya tracking P&O adalah 389,6 Watt dari daya keluaran array Fotovoltaik yaitu 451,32 Watt. Pada kondisi ketiga ini algoritma P&O terjebak pada daya lokal maksimal sehingga selisih antara nilai daya tracking dan daya keluaran array Fotovoltaik terlalu jauh.

Sesuai dengan persamaan 2.23 untuk mendapatkan efisiensi tracking pada skenario keempat dengan perkondisi dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi pertama (Normal)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{1157}{1157,2} \times 100\% \\ &= 99,98 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi kedua (PSC)} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ &= \frac{392,7}{542,6013} \times 100\% \\ &= 72,37 \%\end{aligned}$$

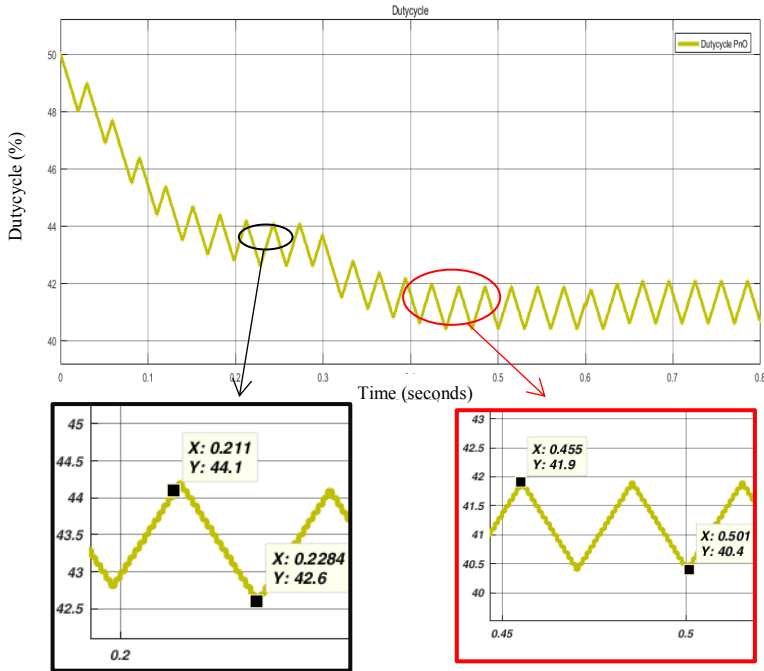
$$\begin{aligned}\text{Efisiensi tracking kondisi ketiga} &= \frac{P_{in.Tracking}}{P_{Karakteristik}} \times 100\% \\ \text{(PSC-Irradian berubah)} &= \frac{389}{451,32} \times 100\% \\ &= 86.19 \%\end{aligned}$$

Pada skenario keempat didapat kondisi normal efisiensi tracking P&O dapat mencapai 99,98%. Sedangkan efisiensi tracking P&O pada kondisi kedua saat mengalami PSC didapat nilai efisiensi tracking sebesar 72,37%. Pada kondisi kedua ini P&O terjebak pada daya puncak lokal sehingga mendapatkan nilai efisiensi dibawah 90%. Pada kondisi terakhir yaitu PSC dan dibarengi dengan berubahan nilai irradiant P&O mampu mentracking dengan efisiensi 86,19% pada kondisi ketiga P&O juga terjebak pada puncak daya lokal dari daya yang harus ditracking yaitu 451,32 Watt. Apabila dari ketiga kondisi pada skenario keempat dirata-rata maka performa tracking P&O mencapai 86,18%. Sehingga dapat dikatakan performa tracking P&O pada skenario keempat ini memiliki performa yang kurang baik.

Nilai *dutycycle* P&O pada pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 4.19. Pada gambar tersebut dipaparkan bahwa kecepatan konvergensi P&O berturut-turut kondisi pertama memiliki kecepatan konvergensi 0,244 detik, sedangkan pada kondisi kedua memiliki kecepatan konvergensi 0,186 detik, dan pada kondisi yang ketiga memiliki kecepatan konvergensi 0,125 detik. Kecepatan tersebut diperoleh setelah melakukan tracking secara bertahap dan mendapatkan nilai *dutycycle* berturut-turut ketiga kondisi adalah *dutycycle* pertama dengan nilai *dutycycle* minimal 42,6% dan *dutycycle* maksimal 44,1%. Pada kondisi yang kedua *dutycycle* minimal 40,4% dan *dutycycle* maksimal sebesar

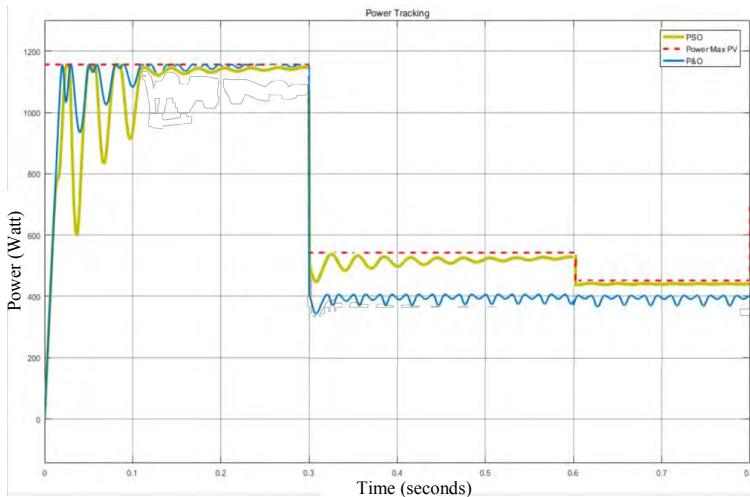


41,9%. Pada kondisi yang ketiga memiliki nilai *dutycycle* minimal 40,6% dan nilai *dutycycle* maksimal sebesar 42,1%.



**Gambar 4. 19** *Dutycycle* algoritma P&O yang dihasilkan oleh sistem MPPT

Pada skenario keempat antara algoritma PSO dan P&O dalam mentracking daya kelauran array Fotovoltaik memiliki perbedaan dalam. Perbedaan antara PSO dan P&O terletak pada *ripple* daya yang telah mencapai titik konvergensi. PSO memiliki *ripple* daya yang lebih kecil dari pada P&O. Hal ini dikarenakan pada saat sudah konvergensi *dutycycle* P&O tidak mampu mencapai puncak secara tepat sehingga *dutycycle* mengalami naik turun secara periodik dan berpengaruh pada daya yang ditracking. Perbedaan daya tracking PSO dan P&O dapat dilihat pada Gambar 4.20. Pada keadaan PSC yaitu kondisi kedua dan ketiga algoritma P&O terjebak dalam puncak daya lokal sehingga daya tracking yang didapatkan P&O memiliki efisiensi daya yang rendah.



**Gambar 4. 20** Kurva daya tracking MPPT PSO dan P&O pada skenario keempat

#### 4.5 Rangkuman Hasil Simulasi

Rangkuman hasil simulasi terhadap keseluruhan skenario pada disetiap kondisi diuraikan pada Tabel 4.1. Pada tabel tersebut dipaparkan masing-masing daya tracking algoritma PSO dan dan teknik P&O. Daya terdeteksi dengan menggunakan teknik P&O dihitung pada nilai daya tracking yang maksimal pada setiap kondisi dengan daya tracking yang terendah diabaikan. Pada kondisi normal, algoritma PSO dan teknik P&O mampu mentracking daya maksimal dengan efisiensi tracking diatas 99,9 %. Hal ini dikarenakan kedua algoritma MPPT tersebut mampu mentracking daya dengan baik. Namun walaupun kemampuan tracking teknik P&O dapat mencapai 99,9%, P&O memiliki kelemahan yaitu memiliki nilai *ripple* daya tracking yang besar jika dibandingkan dengan algoritma PSO. Pada skenario pertama Algoritma P&O tidak terjebak pada kondisi terbayang karena saat perpindahan kondisi dari kondisi satu ke dua kurva karakteristik daya pada kondisi petama jatuh pada kurva karakteristik kedua dengan mendekati puncak global maksimal sehingga daya tracking dapat memiliki efisiensi yang besar.

Pada skenario kedua algoritma PSO memiliki rata-rata akurasi tracking sebesar 99,937%. Pada ketiga kondisi skenario kedua memiliki efisiensi tracking diatas 99,8%. Pada skenario ketiga P&O pada keadaan PSC terjebak pada puncak lokal sehingga efisiensi tracking hanya mencapai 54,2%. Hal ini berbeda dengan efisiensi tracking pada algoritma PSO yaitu mencapai 99,6%. Pada skenario empat rata-rata efisiensi tracking P&O mencapai 86,18 %. Hal ini dikarenakan algoritma P&O pada keadaan PSC terjebak pada puncak lokal dengan efisiensi tracking 72,37%. Sedangkan Algoritma PSO mampu mentracking dengan rata-rata tracking mencapai 99,987%. Pada data tabel tersebut algoritma PSO tidak pernah terjebak pada puncak lokal dan selalu mampu melacak daya maksimal Fotovoltaik dengan efisiensi yang tinggi.

Tabel 4. 1 Hasil Samulasi Keseluruhan Sistem

<b>Panel Surya</b>		<b>Algoritma</b>	<b>Daya Optimum (Watt)</b>	<b>Daya Terdeteksi (Watt)</b>	<b>Akurasi Tracking (%)</b>
<b>Skenario</b>	<b>Urutan Kondisi</b>				
<b>Pertama</b>	Normal	P&O	1280,04	1280	99,99
		PSO	1280,04	1280	99,99
	PSC	P&O	503,531	503	99,98
		PSO	503,531	502,4	99,77
Rata-Rata Tracking	Akurasi	<b>P&amp;O</b>			<b>99,985</b>
		<b>PSO</b>			<b>99,88</b>
<b>Kedua</b>	Normal	P&O	1019	1019	100
		PSO	1019	1019	100
	Irradian berubah	P&O	750	749,4	99,92
		PSO	750	750	100
	PSC	P&O	638	637,9	99,98
		PSO	638	636,8	99,81
Rata-Rata Tracking	Akurasi	<b>P&amp;O</b>			<b>99,967</b>
		<b>PSO</b>			<b>99,937</b>
<b>Ketiga</b>	PSC	P&O	656	355,6	54,2
		PSO	656	653,4	99,6
	Normal	P&O	952,1	952,1	100
		PSO	952,1	952,1	100

Tabel 4. 1 Hasil Samulasi Keseluruhan Sistem lanjutan

<b>Panel Surya</b>		<b>Algoritma</b>	<b>Daya Optimum (Watt)</b>	<b>Daya Terdeteksi (Watt)</b>	<b>Akurasi Tracking (%)</b>
<b>Skenario</b>	<b>Urutan Kondisi</b>				
Rata-Rata Tracking	Irradian berubah	P&O	737	736,6	99,94
		PSO	737	736,8	99,94
	Akurasi	<b>P&amp;O</b>			<b>84,713</b>
		<b>PSO</b>			<b>99,847</b>
	Normal	P&O	1157,2	1157	99,98
		PSO	1157,2	1157	99,98
<b>Keempat</b>	PSC	P&O	542,601	392,7	72,37
		PSO	542,601	542,6	99,99
	Irradian berubah	P&O	451,32	398,6	86,19
		PSO	451,32	451,3	99,99
Rata-Rata Tracking	Akurasi	<b>P&amp;O</b>			<b>86,18</b>
		<b>PSO</b>			<b>99,987</b>

*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian dan simulasi Tugas Akhir yang telah dilakukan, diperoleh beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan sebagai berikut.

1. Perubahan nilai pancaran cahaya matahari yang diterima oleh Fotovoltaik dapat mempengaruhi nilai daya keluaran daya yang dihasilkan Fotovoltaik.
2. Pemodelan Fotovoltaik menggunakan *ideal double diode model* memiliki rata-rata akurasi diatas 99.99% sehingga pemodelan *ideal double diode model* sangat baik untuk pemodelan Fotovoltaik.
3. Kinerja Fotovoltaik pada *partially shaded condition* sangat tergantung algoritma optimisasi yang digunakan agar tidak terjebak pada solusi lokal sehingga dapat penyalurkan daya secara optimal.
4. Pada kondisi normal algoritma P&O dan PSO mampu melacak daya optimum dengan akurasi diatas 99%. Namun pada saat PSC algoritma P&O terjebak dalam solusi lokal menjadikan efisiensi tracking kurang dari 90%. Tapi PSO mampu mentracking daya optimum pada keadaan *PSC* dengan akurasi diatas 99%. Sehingga algoritma PSO mampu mentracking MPP Fotovoltaik dengan efisiensi yang bagus di keadaan normal maupun pada semua keadaan PSC.
5. Pada kondisi normal algoritma P&O dapat digunakan dalam mentracking daya Fotovoltaik dengan efisiensi yang baik. Namun algoritma P&O tidak cocok dalam pelacakan daya Fotovoltaik pada PSC karena memiliki nilai efisiensi yang kurang dari 90%

#### **5.2 Saran**

Dengan mempertimbangkan hasil studi yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, ada beberapa saran yang dapat menjadi masukan kedepannya sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan hasil akurasi yang lebih baik perlu digunakan metode kecerdasan buatan lain selain PSO dan untuk mengetahui perbandingan metode PSO dengan metode yang lain.

2. Pada MPPT yang dirancang pada Tugas Akhir ini perlu diuji coba pada sistem yang lebih besar untuk mendapatkan hasil sistem yang benar-benar teruji.
3. Pada sistem MPPT yang telah dirancang pada Tugas Akhir ini perlu dilakukan pengujian dengan beban yang lain selain beban berupa baterai.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency IEA, "World Energy Outlook, Executive Summary", France, 2012.
- [2] E. I. Batzelis and G. E. Kampitsis, "2.Direct MPP Calculation in Terms of the Single-Diode PV Model Parameters," *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 30, no. 1, pp. 226–235, Mar. 2015.
- [3] B. C. Babu and S. Gurjar, "A Novel Simplified Two-Diode Model of Photovoltaic (PV) Module," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 4, no. 4, pp. 2156–3381, Jul. 2014.
- [4] V. J. Chin and K. Ishaque, "Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review," *elsevier*, vol. 154, pp. 500–519, Dec. 2015.
- [5] M. Louzazn and A. Khouya, "Comparative Prediction of Single and Double Diode Parameters for Solar Cell Models with firefly Algorithm," *Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng.*, vol. 17, pp. 860–865, Mar. 2017.
- [6] T. Eswar and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *TRANSACTIONS ENERGY CONVERSIONIEEE*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [7] S. Babu and N. Rajasekar, "Modified Particle Swarm Optimization technique based Maximum Power Point Tracking for uniform and under partial shading condition," *elsevier*, vol. 34, pp. 613–624, May 2015.
- [8] Y. Hyok Ji, D. Yong Jung, and C. Yuen Wong, "Maximum Power Point Tracking Method for PV Array under Partially Shaded Condition," *IEEE*, pp. 307–312, 2009.
- [9] N. Mohamed and N. Zaihar, "Single Diode Model and Two Diode of PV Modules : A Comparison," *Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng.*, pp. 210–214, Jan. 2013.
- [10] M.K.D.Ulaganathan and C.Saravanan, "Cost-effective Perturb and Observe MPPT Method using Arduino Microcontroller for a Standalone Photo Voltaic System," *Int. J. Eng. Trends Technol. IJETT*, vol. 8, no. 1, pp. 24–28, Jan. 2014.
- [11] V. Tamrakar and G. S.C., "Study of Characteristics of Single and Double Diode Electrical Equivalent Circuit Models of Solar PV Models," *Int. Conf. Energy Syst. Appl. ICESA*, pp. 312–317, Oct. 2015.



- [12] S. Mohammadnejad and A. Khalafi, "Mathematical analysis of total cross tied photovoltaic array under partial shading condition and its comparison with other configurations," *Sol. Energy*, vol. 133, pp. 501–511, 2016.
- [13] N. Abd-ElSabour, "A Review on Evolutionary Feature Selection," *UKSim-AMSS 8th Eur. Model. Symp.*, vol. 14, no. IEEE, pp. 20–26, 2014.
- [14] M. Juneja and S.K.Nagar, "Particle swarm optimization algorithm and its parameters : A review," *Int. Conf. Control Comput. Commun. Mater. ICCCCM*, vol. I, 2016.
- [15] Y. Shi and R. Eberhart, "A Modified Particle Swarm Optimizer," *Dep. Electr. Eng. Indiana Univ.*, pp. 69–73, 1998.
- [16] V. K. Viswambaran and A. Ghan, "Modelling and Simulation of Maximum Power point Tracking Algorithms & Review of MPPT Techniques for PV Applications," *IEEE*, pp. 9–12, 2016.

## LAMPIRAN 1 : Datasheet Panel Surya

# GH SOLAR

The future looks bright

## 80 Wp Polycrystalline Series

## Model GH 80P-18

### Mechanical Data

Solar Cell	High Efficiency Polycrystalline Cell
Cell Efficiency	16.40%
Cell Size	Rectangular (5"x3.5")
Number of Cells	36 cells (3x12 cells)
Dimensions (new)	1200 x 540 x 30 mm
Weight	± 7.5 Kg
Cable Lengths	1000mm
Frame module	Aluminum Alloy
Application Class	A

Solar Cell	High Efficiency Polycrystalline Cell
Cell Efficiency	16.40%
Cell Size	Rectangular (5"x3.5")
Number of Cells	36 cells (3x12 cells)
Dimensions (new)	1200 x 540 x 30 mm
Weight	± 7.5 Kg
Cable Lengths	1000mm
Frame module	Aluminum Alloy
Application Class	A

### Electrical Data

Rated Current (Imp)	4.98 A
Rated Voltage (Vmp)	17.6 V
Short Circuit Current (Isc)	4.98 A
Open Circuit Voltage (Voc)	21.8 V
Fill Factor	0.78
Rated Power (Pmax)	80Wp (0%±3% tolerance)
Module Efficiency	14.5%
Maximum Forward Current	10 A
Maximum System Voltage	1000 V DC

Rated Current (Imp)	4.98 A
Rated Voltage (Vmp)	17.6 V
Short Circuit Current (Isc)	4.98 A
Open Circuit Voltage (Voc)	21.8 V
Fill Factor	0.78
Rated Power (Pmax)	80Wp (0%±3% tolerance)
Module Efficiency	14.5%
Maximum Forward Current	10 A
Maximum System Voltage	1000 V DC

### Warranties & Certifications

Product Warranty	12 years
Power Warranty (80% of Pmax)	10 years
Power Warranty (80% of Pmax)	25 years
Certificates	IEC 61215, IEC 61730, CE

Product Warranty	12 years
Power Warranty (80% of Pmax)	10 years
Power Warranty (80% of Pmax)	25 years
Certificates	IEC 61215, IEC 61730, CE

### Operating Conditions

Operating Temperature	-40°C to +85°C
Mechanical Load	>5400Pa

Operating Temperature	-40°C to +85°C
Mechanical Load	>5400Pa

### Temperature Data

Nominal Operation Cell Temperature (NOCT)	45°C
Current Temperature Coefficient	0.04%/°C
Voltage Temperature Coefficient	-0.32%/°C
Power Temperature Coefficient	-0.35%/°C

Nominal Operation Cell Temperature (NOCT)	45°C
Current Temperature Coefficient	0.04%/°C
Voltage Temperature Coefficient	-0.32%/°C
Power Temperature Coefficient	-0.35%/°C

Specifications in these datasheets are subject to changes without prior notice.

GH SOLAR • Campus Greenhill, Interleuvenlaan 150  
3001 Herentee, België  
website: [www.ghsolar.be](http://www.ghsolar.be)  
[www.anekasurya.com](http://www.anekasurya.com)  
CV. Aneka Surya Energi  
Jl. Mayjend Sungkono, No. 5 Blok BC 6-8, Gresik

contact us

*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

## LAMPIRAN 2 : Datasheet Baterai

Network Power > Powerfit S300



### Powerfit S300

The compact energy source for highest security demands

GNB's Powerfit S300 batteries are general purpose batteries designed to fulfill the highest standards in performance and safety, proven by the renowned VdS certification. They are the ideal solution for applications such as security & alarm systems, emergency lighting, signaling, and any other UPS application where compact and reliable back-up power is key.

### Specifications:

- > Rechargeable VRLA batteries in which the electrolyte is fixed in a glass mat (with very fine glass fibres)
- > Perfect combination of energy storage performance and reliability
- > Maintenance-free (no topping up) during the whole service life
- > Nominal capacity 1.2 – 38 Ah
- > 5 years design life at 20 °C ambient temperature (80% re-maining capacity)
- > Container material conforms to UL 94 V-0
- > Designed in accordance with IEC 60896-21/22
- > Grid plate construction consisting of a lead calcium alloy
- > Low gas emission due to high gas recombination of 99%
- > Low self-discharge rate (about 3% / month at 20 °C)
- > Trouble-free transport of operational blocks, no restrictions for rail, road, sea and air transportation (IATA, DGR clause A67)
- > Completely recyclable

### Technical characteristics and data

Type	Part number	Nom.-voltage V	Nom. capacity C <sub>20</sub> 1.75 Vpc 25 °C Ah	C <sub>10</sub> 1.75 Vpc 25 °C Ah	C <sub>5</sub> 1.6 Vpc 25 °C Ah	Length* (l) mm	Width* (b/w) mm	Height* (h) mm	Weight ca. kg	Internal resistance acc. to IEC 60896-21 mΩ	Max. discharge current (I <sub>5 sec</sub> ) A	Terminal	VdS approval
S306/1.2 S	NAS3060102VWOSA	6	1.20	1.15	0.754	97.0	24.0	58.0	0.29	65.0	18.0	S-4.8	
S306/4 S	NAS3060004VWOSA	6	4.50	4.30	2.83	70.0	47.0	106	0.81	25.0	67.5	S-4.8	
S306/7 S	NAS3060007VWOSA	6	7.50	7.16	4.71	151	34.0	100	1.20	15.0	112	S-4.8	
S306/12 S	NAS3060012VWOSA	6	12.0	11.4	7.49	151	51.0	100	1.95	15.0	180	S-4.8	G 112097
S306/12 SR	NAS3060012VWORA	6	12.0	11.4	7.49	151	51.0	100	1.95	15.0	180	SR-6.3	G 112097
S312/1.2 S	NAS3120102VWOSA	12	1.20	1.20	0.831	97.0	44.0	58.0	0.60	90.0	18.0	S-4.8	G 112093
S312/2.3 S	NAS3120203VWOSA	12	2.30	1.90	1.31	178	35.0	66.0	0.96	90.0	31.5	S-4.8	G 112094
S312/3.2 S	NAS3120302VWOSA	12	3.40	3.20	2.23	134	67.0	67.0	1.35	45.0	51.0	S-4.8	G 112095
S312/4 S	NAS3120004VWOSA	12	4.50	4.30	2.83	90.0	70.0	107	1.45	67.5	40.0	S-4.8	
S312/7 S	NAS3120007VWOSA	12	7.20	6.86	4.49	152	66.0	100	2.50	18.0	108	S-4.8	G 112096
S312/7 SR	NAS3120007VWORA	12	7.20	6.86	4.49	152	66.0	100	2.50	18.0	108	SR-6.3	G 112096
S312/12 S	NAS3120012VWOSA	12	12.0	11.4	7.49	152	98.0	102	3.80	14.0	180	S-4.8	G 112098
S312/12 SR	NAS3120012VWORA	12	12.0	11.4	7.49	152	98.0	102	3.80	14.0	180	SR-6.3	G 112098
S312/18 F5	NAS3120018VWOF5	12	18.0	17.2	11.2	182	77.0	168	5.80	16.0	270	F-M5	G 112099
S312/26 F5	NAS3120026VWOF5	12	26.0	24.8	16.2	167	175	125	8.00	14.0	390	F-M5	G 112100
S312/40 F6	NAS3120040VWOF6	12	38.0	36.5	22.0	197	165	170	13.2	10.0	456	F-M6	G 112101

\* ± 2 mm



Nominal capacity  
1.2 – 38 Ah  
C<sub>20</sub>



Block battery



Grid plate



Recyclable



Valve regulated  
lead-acid  
batteries



Maintenance-  
free (no  
topping up)

*HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN*

## DAFTAR INDEKS

### A

Albert Einstein, 7  
algoritma, 1, 3, 24, 30, 31, 37,  
40, 74, 85, 86, 87, 88, 89, 90,  
91, 92, 93, 94, 95, 96, 98, 99,  
100, 102, 103, 104, 105, 106,  
108, 113  
Aliran, 17  
aluminium, 15  
*array*, 16, 17, 19, 20, 37, 40,  
49, 50, 51, 53, 54, 69, 72, 73,  
74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81,  
82, 85, 86, 88, 91, 94, 95, 97,  
100, 103, 105, 106, 108  
arus, 2, 3, 7, 10, 11, 13, 15, 17,  
18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26,  
27, 28, 29, 34, 40, 41, 47, 48,  
49, 50, 51, 52, 54, 56, 58, 59,  
61, 64, 66, 67, 69  
atom, 7, 8, 9, 49

### B

bahan, i, 7, 8, 10, 15  
Blok, 40  
Boost, xvii, 4, 24, 25, 26, 27,  
40, 52, 57, 63, 69  
Boron, xvii, 8  
box, 16  
*bypass*, 3, 15, 16, 50, 51

### C

cahaya, v, 3, 4, 7, 10, 22, 23,  
37, 39, 73, 75, 85, 91, 113  
*cell*, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16,  
19, 22, 38, 41, 42, 46, 47, 50  
*Circuit*, xvii, xxiii, xxiv, 24  
*Coeffisien*, 70, 72  
Converter, xvii, 24, 25, 26, 27,  
52, 57, 63

### D

daya, v, 1, 2, 3, 4, 7, 11, 18, 19,  
20, 21, 22, 23, 24, 33, 34, 37,  
39, 40, 44, 47, 49, 50, 69, 72,  
74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81,  
82, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92,  
94, 95, 96, 97, 98, 100, 101,  
102, 103, 104, 106, 107, 108,  
109, 113  
dioda, xxiii, xxiv, 2, 8, 13, 15,  
25, 29  
*diode*, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 13,  
14, 15, 16, 38, 41, 42, 47, 50,  
51, 52, 113  
duty cycle, xxiii, 1, 40, 55  
, 39, 90, 93, 95, 96, 99, 101,  
102, 105, 107, 108

### E

effisiensi, 90, 97, 113

Efisiensi, xxiii, 86, 87, 89, 93,  
95, 98, 99, 101, 105, 107  
electron, 7, 8, 9, 18, 49  
elektrik, 10, 16  
elektron, 9, 17, 18

## F

fisika, 7  
fosfor, 8, 9  
Fotovoltaik, v, xvii, 1, 3, 4, 6,  
7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 18,  
21, 22, 23, 37, 38, 39, 40, 42,  
45, 46, 47, 49, 50, 52, 56, 69,  
72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80,  
82, 83, 85, 86, 88, 89, 90, 91,  
94, 95, 96, 97, 98, 100, 102,  
103, 105, 106, 108

## G

global, 31  
Grafik, 45, 46, 54, 61, 62, 68,  
69, 94, 102

## I

ideal, xxiii, 2, 10, 11, 13, 14,  
15, 38, 41, 42, 43, 47, 113  
inductor, 25, 27, 52, 56, 59, 61,  
67  
Inersia, xxiv, 70, 72  
Irradian, 42, 47, 93, 95, 99,  
101, 105, 107  
Irradiant, xxiii, 10, 15, 78

## J

*junction*, 9, 13

## K

kabel, 19  
kaca, 15  
kapasitor, 25, 29, 52, 59, 60, 66  
karakteristik, 2, 3, 20, 21, 22,  
23, 24, 30, 33, 37, 45, 46, 47,  
48, 49, 73, 76, 79, 81, 82  
Kecerdasaan, 30  
kondisi, i, iii, v, ix, xxiii, 3, 4,  
12, 15, 16, 24, 25, 26, 37, 38,  
39, 47, 53, 56, 72, 74, 75, 78,  
80, 82, 85, 86, 87, 88, 89, 90,  
91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98,  
99, 100, 101, 102, 103, 104,  
105, 106, 107, 108, 113  
konsep, 9  
kurva, 3, 20, 21, 22, 23, 24, 33,  
47, 49, 89

## L

listrik, xxiii, xxiv, 1, 7, 9, 10,  
15, 16, 17, 22, 28, 47, 50, 52  
logam, 7

## M

matahari, v, 1, 3, 4, 7, 10, 14,  
39, 42, 50, 52, 72, 85, 91, 97,  
103, 106, 113  
MATLAB, 3, 4

model, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 14,  
38, 40, 41, 42, 44, 46, 47,  
113  
modul, 15, 16, 17, 18, 19, 20,  
22, 23, 24, 33, 37, 46, 47, 48,  
49, 50, 52, 53, 72, 73, 75, 76,  
78, 79, 80, 85, 88, 106  
MOSFET, 25, 38, 39, 52, 69  
MPP, v, vii, xxiii, 2, 20, 21, 23,  
33, 72, 74, 85, 86, 88, 97,  
105, 113  
MPPT, i, iii, v, vii, ix, xix, xx,  
xxiii, 1, 2, 3, 4, 21, 22, 24,  
37, 38, 39, 40, 47, 69, 85, 87,  
88, 89, 90, 91, 93, 94, 96, 97,  
99, 100, 102, 103, 105, 108,  
109, 114

## N

Nasional, 1  
normal, v, 3, 4, 20, 21, 37, 38,  
47, 51, 72, 75, 78, 79, 80, 82,  
85, 86, 88, 89, 90, 92, 95, 97,  
99, 101, 103, 104, 105, 107,  
113

## O

Optimisasi, i, iii, v, ix, 1, 2

## P

panel, 15, 16, 17, 23, 33, 40,  
50, 52, 72

parameter, 2, 4, 10, 11, 12, 13,  
14, 22, 37, 40, 42, 44, 47, 54,  
56, 70, 72  
partikel, 2, 7, 30, 31  
periodik, 89, 91, 94, 96, 102,  
108  
populasi, 29, 30  
positif, 8, 9  
puncak, xxiv, 3, 22, 33, 56, 72,  
74, 75, 76, 82, 89, 90, 96, 97,  
100, 102, 106, 107, 108  
PWM, 38, 39, 40, 52

## R

radiasi, v, 1, 7, 14, 20, 23, 42,  
47, 73, 78, 80, 82  
rangkaian, 10, 25, 26, 51  
Rangkaian, xvii, 10, 11, 12, 13,  
14, 25, 41  
recomendasi, 2  
Resistansi, 2  
resistor, 11, 38, 40, 52  
ripple, 3, 27, 28, 29, 56, 60, 61,  
62, 66, 67, 68, 69, 89, 90, 94,  
96, 98, 102, 108

## S

semiconductor, 10  
seri, xxiv, 11, 15, 17, 18, 19,  
42, 47, 50, 54  
*shading*, 3, 4, 7, 16, 19, 22, 37,  
38, 39, 50  
shunt, 2, 14, 41  
silicon, 8



**sistem**, x, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 24,  
 26, 28, 39, 48, 50, 51, 52, 54,  
 69, 85, 87, 88, 90, 93, 96, 99,  
 101, 102, 105, 108, 114  
 Sistem, iii, v, x, xi, xix, xx, 1,  
 3, 4, 6, 25, 37, 38, 39, 40, 52,  
 125  
 skenario, 56, 72, 73, 74, 75, 76,  
 77, 78, 79, 80, 81, 82, 85, 86,  
 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94,  
 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101,  
 102, 103, 104, 105, 106, 107,  
 108, 109  
 Software, 3  
 solar, 16, 46  
 Spesifikasi, 46, 47, 52, 54, 56,  
 57  
 suhu, xi, 2, 11, 14, 16, 20, 23,  
 37, 41, 42, 45, 47, 49, 85, 88,  
 91, 97, 103, 105

sumber, xxiv, 10, 11, 12, 13,  
 26, 30, 40, 51, 52, 56, 57, 59,  
 62, 63, 68

## **T**

tengangan, 20, 45, 53  
 turbin, 17, 18

## **W**

waktu, ix, x, 1, 2, 26, 28, 29,  
 42, 58, 59, 60, 64, 65, 66, 72,  
 74, 75, 77, 79, 80, 82, 83, 85,  
 87, 91, 98, 103

## **Z**

zat, 8

## RIWAYAT PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Muhammad Irfan Bahrudin lahir pada tanggal 5 Agustus 1993 , Tulungagung. Lahir sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara. Pada tahun 2006, Lulus dari MIN Tungangri dan melanjutkan studinya ke MTsN Tungangri. Pada tahun 2009, melanjutkan ke SMAN 1 Boyolangu dan lulus pada tahun 2012. Penulis diterima menjadi mahasiswa D3 Teknik Elektro ITS pada tahun 2009 dan lulus pada tahun 2012. Penulis melanjutkan kuliah dengan program Lintas Jalur Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2015 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Pengalaman Kerja yaitu kerja praktik di PT. TELKOM AKSES SURABAYA pada tahun 2014 selama satu bulan, dan pada tahun 2016 Kerja praktik di PT. IPMOMI Paiton –Probolinggo. Penulis aktif di organisasi kampus. Pada tahun 2013 sampai 2014 menjadi Staff BEM Fakultas Teknologi Industri ITS Departemen Pendidikan Keilmiah dan Teknologi. Pada tahun 2014 sampai 2015 menjadi kabirol Keilmiah Hima D3 TEKNIK ELEKTRO ITS. Pada tahun yang sama juga aktif di Pemandu Keilmiah Fakultas Teknologi Industri ITS. Dan pada tahun 2017 menjadi Ketua Senat Penerima beasiswa XL FUTURE LEADER Batch 5.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*